

Trabajo Final de Máster

Máster Universitario de Ingeniería Industrial

Monitorización y análisis del consumo energético de la ETSEIB

MEMORIA

Autor: Raúl Álvarez Pérez
Director: Roberto Villafáfila
Convocatoria: Abril 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En este trabajo de final de máster se pretende sacar partido al software de monitorización energética implantado en el edificio del Campus Sud ETSEIB, analizando los consumos eléctricos, potencias demandas o parámetros correspondientes a la calidad de red de suministro.

Previamente al análisis, se han estudiado las diferentes herramientas de gestión medioambiental en edificios, así como su obligatoriedad. A continuación, se han documentado los equipos de medida utilizados para la monitorización, su instalación en el edificio y funcionalidades del programa.

Se han extraído datos de consumo eléctrico para los años 2016 y 2017, y se ha analizado el consumo, tanto de manera agregada, como separando consumos por pabellón y planta. También se han graficado curvas de consumo diarias, para observar las tendencias de consumo del edificio durante los diferentes periodos del año. Además de la energía consumida, se ha realizado un estudio de potencia demandada en el último año y se ha observado la posibilidad de optimizar la potencia actual contratada en la escuela, disminuyendo así la componente fija de la factura eléctrica.

Seguidamente se han analizado otras variables como son el consumo de potencia reactiva, el desequilibrio entre fases o la existencia de armónicos en los transformadores de la instalación, mediante uso del mismo software de monitorización.

Finalmente, y tras los análisis realizados, se propone implantar medidas para seguir con la tendencia de ahorro energético y sostenibilidad para los siguientes años.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Objetivos del proyecto	5
1.2. Alcance del proyecto	6
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Pla UPC 2020.....	7
2.2. Sistema de monitorización disponible	7
2.3. Gestión medioambiental.....	8
3. EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA	11
3.1. Costes técnicos	12
3.2. Costes económicos	14
3.3. Costes ecológicos	19
4. MONITORIZACIÓN DE CONSUMOS	21
4.1. Elementos de monitorización	21
5. CASO PRÁCTICO: ESTUDIO ENERGÉTICO DE LA ETSEIB	30
5.1. Análisis de consumos.....	30
5.2. Consumo de energía reactiva	42
5.3. Optimización de potencia	43
5.3.1. Tarifas 3.0 y 3.1	44
5.3.2. Tarifas 6.X y caso estudio	47
5.4. Análisis de red	54
5.4.1. Compensación de líneas.....	54
5.4.2. Nivel de armónicos.....	56
5.4.3. Factor de potencia	59
6. MEDIDAS DE AHORRO Y ANÁLISIS ECONÓMICO	62
6.1. Propuesta 1: Nueva optimización de potencia	62
6.2. Propuesta 2: Implantación ISO 50001	63
7. PRESUPUESTO	65
8. IMPACTO AMBIENTAL	66
CONCLUSIONES	69

AGRADECIMIENTOS	71
------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	72
---------------------	-----------

Referencias bibliográficas	72
----------------------------------	----

Bibliografía complementaria	74
-----------------------------------	----

1. Introducción

El aumento en la calidad de vida del ser humano ha implicado, irremediablemente, un aumento del consumo energético en los últimos años. Como resultado, se ha llegado a un uso desproporcionado de los recursos energéticos, muchos de los cuales son limitados. De la mano de lo anterior, también se ha incrementado la contaminación en las ciudades: los gases invernadero debidos a la combustión de combustibles fósiles y su contribución al cambio climático, que ya es una amenaza real. A estos factores hay que sumar el fuerte incremento que ha habido estos últimos 6 años en el precio de la energía.

Con la intención de mitigar este crecimiento, ha cobrado mucha importancia la eficiencia energética. Este concepto se traduce, a groso modo, en utilizar menos recursos para realizar la misma tarea que se realizaba anteriormente, sin repercutir en la calidad del resultado. Con políticas de este tipo se consigue ventaja competitiva, al poder disminuir costes, mostrar una imagen comprometida con el medioambiente y una reducción real de las emisiones de CO₂.

No obstante, existe un gran número de establecimientos en los que el desconcierto y la falta de información sobre los consumos de energía que generan imposibilitan el desarrollo de medidas de eficiencia energética. Es por ello, que cuando se pretende tomar medidas de este tipo, un software de gestión de la energía puede resultar de gran ayuda.

1.1. Objetivos del proyecto

El presente proyecto tiene la intención de mostrar las virtudes de un sistema de gestión energética (SGE) y prestar un servicio similar al que puede dar una empresa de consultoría energética en un edificio del sector terciario como es la *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona* y su papel fundamental en el *Pla UPC 2020*.

Por ello el principal objetivo del proyecto es el de evaluar el sistema de monitorización y analizar los consumos energéticos de la escuela, centrándose únicamente en la energía eléctrica. Para alcanzar este objetivo principal, se contemplan otros de carácter específico:

- Conocer los diferentes elementos que participan en una instalación eléctrica para la toma de datos de un sistema de gestión energético.
- Análisis y evolución en los consumos eléctricos del edificio durante los años 2016 y 2017.
- Estudio de la calidad de red mediante variables generadas a partir de la monitorización

del edificio.

- Proponer medidas de eficiencia energética que puedan mejorar la situación actual del edificio a partir de la información extraída.

1.2. Alcance del proyecto

El *Pla UPC 2020* alberga, entre otros objetivos, la reducción y optimización del gasto energético tomando como referencia el año 2007. Este plan engloba hasta 18 campus entre los que están Campus Nord, Baix Llobregat, ETSAV, ETSEIB o EPSEM. Particularmente, este trabajo se centra en estudiar los consumos energéticos del edificio ETSEIB.

Un estudio sobre eficiencia energética está referido a toda la demanda energética del edificio y sus fuentes de obtención. Sin embargo, se limitará a estudiar únicamente los consumos eléctricos, dejando de lado los consumos de agua y gas. El motivo de esta decisión es que la base en la que se cimienta este proyecto, es el partido que se le puede sacar al software de monitorización y éste actualmente tan sólo obtiene información en tiempo real de la electricidad.

Por lo que respecta al análisis energético, se estudiarán los consumos correspondientes a los años 2016 y 2017, entre los que se podrán observar la evolución y extraer conclusiones. En apartados más específicos, como puede ser el análisis de calidad de red, se extraerán datos de un día lectivo en la escuela.

2. Estado del arte

En este apartado se hace un repaso de las políticas introducidas en la escuela con tal de reducir el gasto energético, del sistema implantado y de las herramientas de gestión medioambiental disponibles en la actualidad.

2.1. Pla UPC 2020

Se trata de un plan que se enmarca en la estrategia UE 2020 de eficiencia energética para 2020, el cual propone reducir un 20% el consumo primario de la UE y reducir un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto 1990, así como aumentar la contribución de las energías renovables al 20% del consumo.

En Cataluña, la referencia es el *Pla de l'Energia i Canvi Climàtic de Catalunya 2012-2020*. La UPC firmó un convenio con el ICAEN en el año 2015 para mejorar la eficiencia energética de las instalaciones de los edificios de la Universidad y reducir el gasto energético.

El objetivo de este plan es conseguir una universidad de baja intensidad energética y baja emisión de dióxido de carbono a partir de 4 líneas claras de acción [1]:

- 1) Reducir en un 20% el consumo de energía respecto al año 2007.
- 2) El 20% de la energía provenga de origen renovable.
- 3) Involucrar a alumnos en actividades de mejora sostenible y uso de edificios piloto.
- 4) Conseguir el certificado energético en el 100% de los edificios de la UPC

Algunas de las medidas que ya se han tomado:

- Monitorización de las instalaciones para analizar la evolución de sus consumos.
- Optimización de la potencia contratada en los edificios del grupo.
- Compra de energía conjunta.
- Nombramiento de gestor único.

2.2. Sistema de monitorización disponible

Se dispone de dos herramientas de visualización de datos: el SIRENA [2], destinado a hacer más accesible la información energética a todos y el PowerStudio [3], destinado a un perfil más especialista.

Actualmente, el servicio SIRENA cuenta con una red de monitorización de más de 200 puntos de lectura, que reenvían los datos al sistema SCADA PowerStudio. El acceso a SIRENA es

abierto y se pueden consultar los datos de consumo de los edificios de la UPC. Existe un perfil con más permisos que permite realizar un análisis más detallado y otras funcionalidades que requiere de autenticación.

En el momento de realizar este trabajo, el sistema registra el consumo eléctrico (kWh) cada 15 minutos en todos los campus, pero no así los consumos de gas (kWh) y agua (m³), que han de ser introducidos de manera manual. Estos datos pueden ser consultados en tiempo real o en períodos históricos.

Para un estudio más avanzado y detallado, el sistema dispone de la herramienta PowerStudio. Este software permite analizar específicamente un campus y discriminar en edificios. Además, permite estudiar la calidad de suministro del edificio en cuestión, mostrando parámetros más técnicos. En el apartado 4.1 se analizará con más profundidad su funcionamiento.

2.3. Gestión medioambiental

Los edificios representan más de un tercio de la energía que se usa en todo el mundo, además de producir el 40 % de las emisiones mundiales de CO₂, según indica la Agencia Internacional de la Energía. Por ello, es una prioridad minimizar su impacto en el medioambiente. En este contexto cobran sentido las certificaciones ambientales de los edificios.

Se trata de herramientas que evalúan el impacto ambiental que genera el edificio o su comportamiento energético con respecto a su entorno. Suponen un reconocimiento de los valores ambientales de un edificio.

Certificaciones energéticas de cumplimiento obligatorio

A continuación se comentan algunas certificaciones de carácter obligatorio.

Real Decreto 56/2016

Existen algunos procesos que son de cumplimiento obligatorio. En España está el RD 56/2016 para auditorías energéticas. Este real decreto se aplica a aquellas empresas que tengan al menos 250 trabajadores o un volumen de negocio que exceda los 50 millones de euros y establece obligatoriedad a someterse a una auditoría energética cada cuatro años, que cubra al menos el 85 % del consumo total. Es equivalente a tener implantado y certificado, por un organismo independiente, un sistema de gestión energética o ambiental que incluya una auditoría energética según las directrices de la normativa.

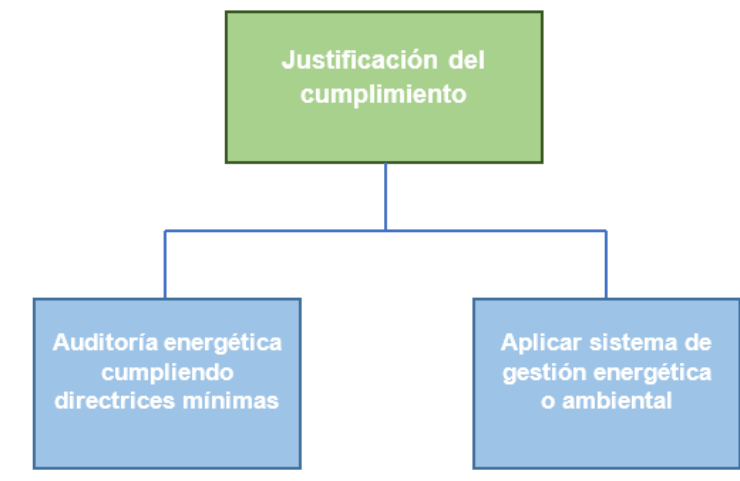


Figura 2.1 Resumen del RD 56/2016

En la actualidad, se han certificado 30 edificios de la UPC y 10 están pendientes en tramitación o fase de estudio. El edificio ETSEIB es uno de esos edificios pendiente todavía de certificar.

Otra normativa obligatoria es el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) que establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones a atender la demanda de bienestar térmico e higiénico a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía. En materia de instalaciones y seguridad también se encontraría el REBT (Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión), de obligado cumplimiento.

Herramientas y certificaciones voluntarias

Existen otros procesos de implantación voluntaria.

- ISO 50001

Se trata de una normativa internacional que tiene por objetivo mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía en una organización, cuyo propósito es el de permitirle una mejora continua de la eficiencia energética, la seguridad energética, la utilización de la energía y el consumo energético con un enfoque sistemático. Se basa en el ciclo PLAN-DO-CHECK-ACT y con este enfoque estructurado, una organización tiene más posibilidades de observar beneficios tangibles.

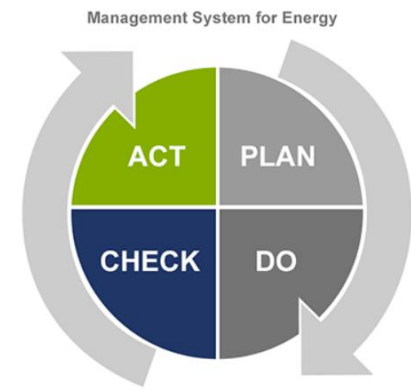


Figura 2.2 Fases ISO 50001

En los últimos años, la implantación de esta normativa ha cobrado sentido y las grandes corporaciones ya lo tienen dentro de sus políticas de calidad, más cuando supone la manera de no tener que repetir una auditoría energética cada cuatro años como sucede con las grandes empresas que han de dar cumplimiento al RD 56/2016. Más allá de esto último, constituye una herramienta de rápida amortización y que aporta valor añadido a la empresa.

- LEED®

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED®) se caracteriza por proporcionar una evaluación de la sostenibilidad de la edificación valorando su impacto en 5 áreas principales: emplazamiento sostenible, protección y eficiencia del agua, eficiencia energética y energías renovables, conservación de materiales y recursos naturales y calidad del ambiente interior. Es un sistema flexible que puede ser aplicado en cualquier tipo de edificación. La suma de las puntuaciones determina el nivel de certificación: Certificado, Plata, Oro, Platino.

- BREEAM®

Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM®), se trata de un Sistema de evaluación similar al anterior con 9 categorías: gestión, salud y bienestar, energía, transporte, materiales, residuos, agua, uso del suelo y ecología, y contaminación. Los resultados se traducen en una puntuación global del siguiente modo: Aprobado, Bien, Muy Bien, Excelente y Destacado

Estos certificados están pensados para que, ya desde el diseño de un edificio, se tomen en cuenta medidas para favorecer la sostenibilidad.

Las ventajas económicas de estas certificaciones son evidentes. Un edificio certificado como LEED® y BREEAM® puede disminuir su consumo energético hasta un 50 % y aumentar su valor inmobiliario 7,5% [5].

3. Eficiencia energética eléctrica

Se entiende por eficiencia energética eléctrica, la reducción de las potencias y energías demandadas al sistema eléctrico sin que afecte a las actividades normales realizadas en edificios o industrias.

Un estudio de ahorro y eficiencia energética comporta lo siguiente:

- Reducción de emisiones de CO₂ al reducir la demanda de energía para ayudar a la sostenibilidad del sistema y medio ambiente.
- Aumento del rendimiento de las instalaciones, mejorar su gestión técnica evitando paradas de procesos y averías.
- Reducción, tanto del coste económico de la energía como del de explotación de las instalaciones.

Así, para la realización de una instalación eléctrica eficiente se plantean cuatro puntos básicos:

- 1) Gestión y optimización de la contratación.
- 2) Gestión interna de la energía mediante sistemas de medida y supervisión.
- 3) Gestión de la demanda.
- 4) Mejoras de productividad mediante el control y eliminación de perturbaciones.

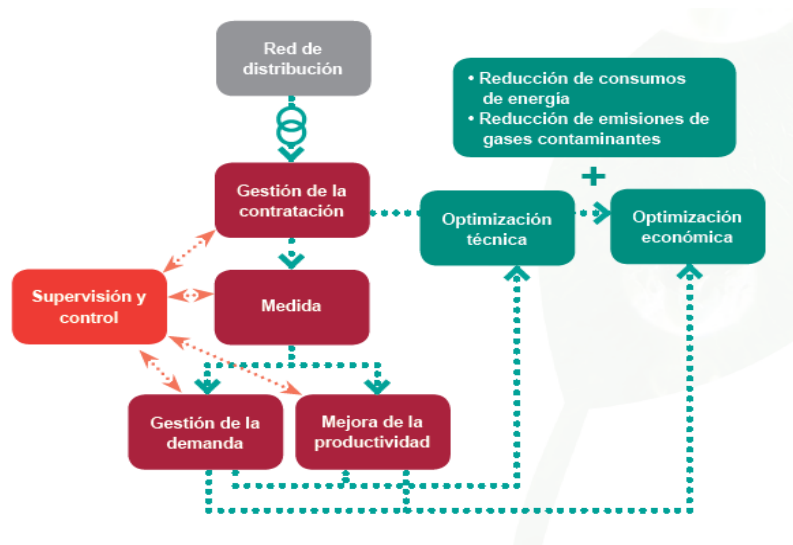


Figura 3.1 Esquema de control de eficiencia energética eléctrica. (Fuente: *Guía técnica de eficiencia energética eléctrica- Circutor*)

3.1. Costes técnicos

Se entiende por costes técnicos la pérdida de capacidad de transporte y distribución, así como los calentamientos por efecto Joule, perturbaciones y caídas de tensión en instalaciones y sistemas eléctricos. Las causas de esta saturación de las instalaciones se comentan a continuación.

Existencia de potencia reactiva

La potencia reactiva no es una potencia realmente consumida en la instalación, ya que no produce trabajo útil. Sin embargo, siendo la potencia aparente (S) la suma vectorial de potencia activa (P) y reactiva (Q), la existencia de esta última supone un aumento en la corriente consumida para un mismo trabajo útil. Esta sobreintensidad puede conllevar riesgos:

- Incremento de las pérdidas en los conductores: las pérdidas por efecto Joule aumentan y con ello el calentamiento de los conductores, acelerando el deterioro de los aislamientos y reduciendo la vida útil de los mismos.
- Aumento de la caída de tensión: la circulación de corriente a través de un conductor eléctrico produce una caída de tensión definida por la ley de Ohm. Aumentar la intensidad de corriente producirá una mayor caída de tensión, pudiendo afectar a los procesos y equipos.
- Menor disponibilidad de potencia nominal en el transformador: éstos se diseñan para una potencia aparente cercana a la nominal en kW, por lo que la existencia de reactiva supone una reducción del rendimiento.

Existencia de corrientes armónicas

Las diferentes cargas no lineales existentes absorben de la red corrientes periódicas no sinusoidales. Estas corrientes están formadas por una componente elemental de frecuencia 50 o 60 Hz, más una serie de corrientes superpuestas de frecuencias múltiples de la elemental, conocidas como armónicos. El resultado es una deformación del corriente y, como consecuencia, de la tensión.

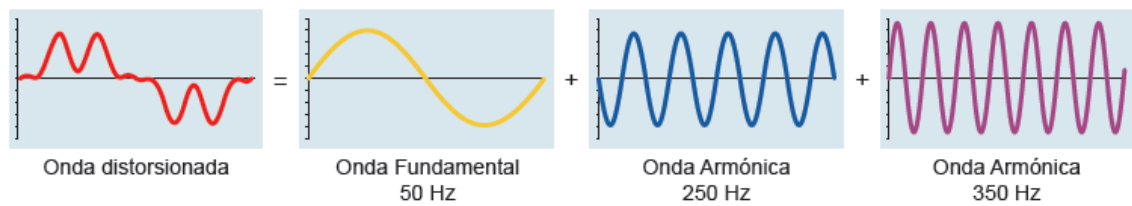


Figura 3.2 Formación onda distorsionada. (Fuente: *Guía técnica de eficiencia energética eléctrica-CIRCUTOR*)

Hace unos años, los armónicos no se consideraban un problema porque sus efectos en las redes de distribución eran poco importantes. Sin embargo, con la introducción masiva de la electrónica de potencia en los equipos ha hecho que este fenómeno sea más grave.

La presencia de armónicos puede acarrear lo siguientes costes:

- Pérdidas energéticas: se incrementan las pérdidas por efecto Joule en los conductores como consecuencia de una sobreintensidad.
- Mayores costes de contratación: la presencia de armónicos puede requerir un nivel superior de potencia contratada.
- Sobredimensionar elemento de la instalación: los conductores deben dimensionarse teniendo en cuenta la circulación de intensidades armónicas, incluyendo en este aspecto el conductor neutro.
- Reducción de la vida útil de los equipos: en transformadores, por ejemplo, los armónicos pueden provocar un sobrecalentamiento en los devanados y aumento de pérdidas magnéticas, lo que se traduce en un descenso del rendimiento.
- Disparos intempestivos y parada de la instalación: los interruptores automáticos en la instalación se someten a picos de intensidad producidos por los armónicos y producen disparos intempestivos con las consecuentes pérdidas de producción.

Desequilibrio de fases

Las cargas monofásicas y trifásicas desequilibradas provocan desequilibrios en las líneas eléctricas y comportan la circulación de corriente por el neutro.

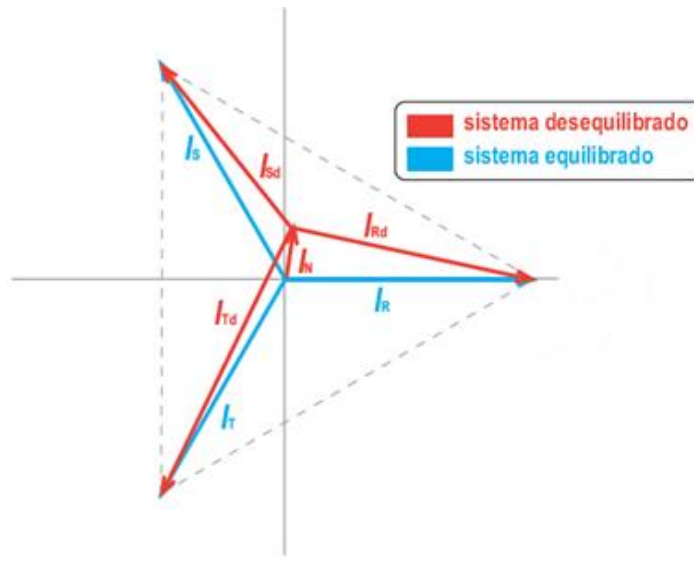


Figura 3.3 Fases desequilibradas (Fuente: *Guía técnica de eficiencia energética eléctrica-CIRCUTOR*)

El problema del corriente neutro se agrava si existen cargas generadoras de armónicos, ya que aumentará el valor de este corriente. Este desequilibrio puede conllevar:

- Disparos de protecciones: el hecho de sobrecargar una de las fases más que el resto puede llevar a que los valores de corriente sobrepasen los límites y salten las protecciones. De la misma forma sucederá si circula corriente por el conductor neutro.
- Infrautilización de las fases: como consecuencia de lo anterior, las fases con menos cargas están siendo utilizadas por debajo de su capacidad, disminuyendo el rendimiento de la instalación.
- Deterioro de los conductores.
- Aumento de pérdidas por efecto Joule.
- Sobredimensionar la sección de los conductores.

3.2. Costes económicos

Son los costes correspondientes a una factura eléctrica y que las comercializadoras facturan según el Real Decreto 1164/2001 [6].

Potencia contratada no adecuada

El coste asociado a la potencia contratada en una tarifa eléctrica corresponde al término de potencia.

$$FP = \sum_{i=1}^n t_{pi} \cdot Pf_i \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

- Pf_i : potencia a facturar en el período tarifario i , expresado en kW
- t_{pi} : precio anual del término de potencia del período tarifario i .

Cada mes se factura la dozava parte del resultado de aplicar la fórmula anterior.

Para las tarifas de menos de 15 kW, los excesos de potencia eléctrica no se penalizan ya que se dispone de un ICP que interrumpe el suministro. Pero en el caso de más de 15 kW, el control de potencia demandada se realiza mediante un maxímetro que registra la potencia máxima cuarto horaria y según periodo.

Para las tarifas 3.0 y 3.1, la facturación de la potencia se realiza según el siguiente criterio:

- Si la potencia máxima demandada, registrada en el período de facturación, estuviere dentro del 85 al 105 por 100 respecto a la contratada, entonces la potencia máxima marcada será la facturada.
- Si la potencia máxima demandada, registrada en el período de facturación, fuese superior al 105 por 100 de la potencia contratada, la potencia a facturar en el período considerado (Pf_i) será igual al valor registrado más el doble de la diferencia entre el valor registrado y el valor correspondiente al 105 por 100 de la potencia contratada.
- Si la potencia máxima demandada en el período a facturar fuere inferior al 85 por 100 de la potencia contratada, la potencia a facturar (Pf_i) será igual al 85 por 100 de la citada potencia contratada.

Para tarifas 6.X, el control de la potencia demandada se realizará por medio de las mediciones cuarto horaria de los equipos de medida:

En el caso de que la potencia demandada sobrepase en cualquier período horario la potencia contratada, se procederá, además, a la facturación de todos y cada uno de los excesos registrados en cada período, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$F_{EP} = \sum_{i=1}^6 K_i \cdot 234 \cdot Ae_i \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

- K_i : Coeficiente que tomará los siguiente valores dependiendo del período tarifario i:

Período	1	2	3	4	5	6
K_i	1	0,5	0,37	0,37	0,37	0,17

- Ae_i : Corresponde a los excesos en cada período

$$\sqrt{\sum_{j=1}^n (Pd_j - Pc_i)^2} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde:

- Pd_j : potencia demandada en cada uno de los cuartos de hora del período i en el que se haya sobrepasado Pc_i
- Pc_i : potencia contratada en el período i considerado

Resulta lógico que la potencia contratada se adecúe lo máximo a la potencia instalada para evitar este sobrecoste. Antes de realizar cualquier cambio en la potencia contratada es imprescindible conocer las curvas de demanda diarias de la instalación.

Tarifa eléctrica no adecuada

Cada tarifa eléctrica se clasifica según tres variables: potencia, tensión y periodos de facturación. Para todas ellas se establece lo que se conoce como el peaje de acceso (fijado en Orden ITC/688/2011 [7]), que corresponde a un importe implícito en el término de potencia y en el de energía. Por ello será determinante plantearse si se dispone o no de transformadores para comprar la energía en alta o baja tensión, o si interesa tener discriminación horaria en los periodos de facturación.

Nivel de tensión	Tensión de suministro (kV)		Potencia de suministro (kW)		Acceso	Periodos
	mínima	máxima	mínima	máxima		
Baja tensión	-	1	-	10	2.0A	1
					2.0DHA	2
			>10	15	2.1A	1
					2.1DHA	2
			>15	50	3.0A	3
Alta tensión	1	36	-	450	3.1A	3
			450	-	6.1A	6
	36	72,5	-	-	6.2A	6
	72,5	145	-	-	6.3A	6
	145	-	-	-	6.4A	6

Tabla 3.1 Tarifas de acceso (Fuente: Orden ITC/688/2011)

Consumo horario de energía

Es el término variable de la factura eléctrica (€/kWh). Estos costes correspondientes al término de energía tienen una parte fijada por cada comercializadora eléctrica y dependen de los consumos de la instalación. Es por ello que es necesario realizar un estudio de los consumos horarios e intentar suprimir aquellos consumos que no aporten valor. Otra manera de reducirlo es, si existe posibilidad, consumir energía en periodos valle, donde el coste del kWh es más económico.

En el libre mercado eléctrico español existen dos formas de contratar el término energía: tarifa a coste fijo o tarifa indexada.

En el primer caso, el precio que se pagará en cada período (€/kWh), será el mismo para toda la vigencia del contrato. Este precio se fija teniendo en cuenta la previsión en el mercado de futuros que realiza OMIP (*Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Portugués*). Esta modalidad puede ser de una gran utilidad para realizar una planificación de los costes asociados a la energía en base a un histórico de consumos. Por otro lado, en esta modalidad el riesgo es asumido en mayor parte por la compañía comercializadora que cierra un precio a unas estimaciones de futuros, por ello, es importante saber, que además de todos los costes asociados a mercado y regulados por el gobierno, se le añade una prima de riesgo que hace que el precio horario firmado pueda llegar a ser mayor que el real.

En cuanto a la modalidad indexada, su principal característica es que el precio de la energía (€/kWh) está vinculado al precio real del *pool* eléctrico proporcionado por OMIE (*Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Español*) más el margen de gestión que incluya la

comercializadora, eliminando el coste de la prima de riesgo. Es decir, no existe ningún tipo de previsión, de tal manera que el cliente siempre va a pagar el precio real de la energía por hora. Esta configuración, permite al cliente hacer una gestión energética activa, pudiendo aprovechar los momentos de menor demanda energética para consumir.

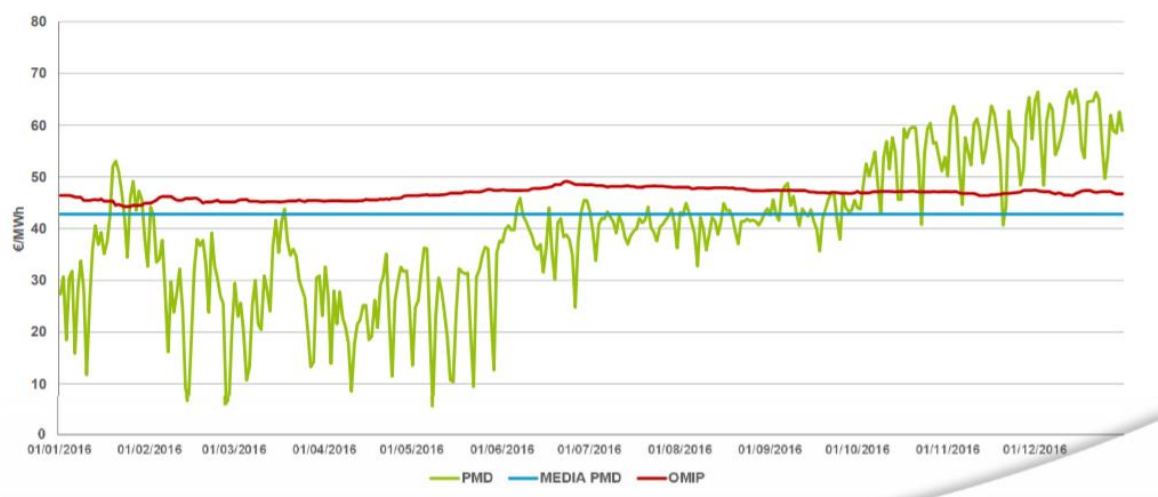


Figura 3.4 Comparativa OMIP vs. OMIE para el año 2016. (Fuente: <https://gesternova.com/>)

En resumidas cuentas:

	Fijo	Indexado
Ventajas	<p>Mismo precio por periodo todo el contrato</p> <p>Sin necesidad de conocer el mercado eléctrico</p> <p>Factura de fácil comprensión</p>	<p>Cliente puede influir en el precio final</p> <p>No suelen tener permanencias y permiten paso a precio fijo</p> <p>A la larga implica ahorro</p>
Inconvenientes	<p>Prima de riesgo suele ser elevada</p> <p>Implica permanencia</p>	<p>Precio factura sujeto a la volatilidad del precio de la energía eléctrica</p> <p>Factura compleja</p>

Tabla 3.2 Ventajas e inconvenientes de las dos modalidades a contratar

Consumo de energía reactiva

Existe otra penalización en la factura eléctrica debida al consumo de potencia reactiva:

- En tarifas con potencias menores a 15 kW: se factura únicamente si la energía reactiva supera el 50% del consumo de energía activa.
- En tarifas con potencias mayores a 15 kW: se factura el exceso de energía reactiva cuando ésta supera el 33% de la energía activa consumida durante el período de facturación a considerar ($\cos \varphi < 0,95$). Se aplica a todos los períodos, salvo el valle (P3 de las tarifas 3.X y P6 de las 6.X)

Este consumo de reactiva se calcula:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Er_i \times Tr \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Siendo:

- Er_i : Exceso de reactiva en período i (kvarh)
- Tr : Coste de la penalización (€/kvarh)

El exceso de potencia (kvarh) corresponde a lo excedido del 33% de reactiva y el término regulado (€/kvarh) viene definido por el factor de potencia.

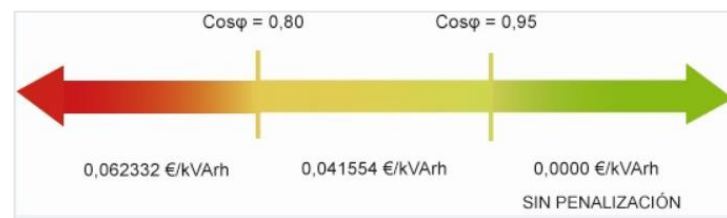


Figura 3.5 Precio de la penalización según el $\cos \varphi$ (Fuente: <https://gesternova.com/>)

Para eliminar este sobrecoste se requiere compensar la energía reactiva con la instalación de baterías de condensadores.

3.3. Costes ecológicos

Son los costes asociados a las emisiones de CO_2 producidas por el consumo de energía no necesaria o prescindible. El consumo de 1 kWh eléctrico generado mediante energías primarias fósiles y renovables supone alrededor de 0,65 kg de CO_2 . Las soluciones para

disminuir la emisión de gases de efecto invernadero pasan por:

- Concienciación al personal usuario de las instalaciones para reducir consumos.
- Instalación de equipos que permitan control y supervisión del consumo energético.
- Conocer qué consumos pueden ser disminuidos.
- Conocer qué receptores deben ser sustituidos por otros más eficientes.

En este contexto, existe también el denominado Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE (RCDE UE) [8]. Se trata de una herramienta administrativa utilizada para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero. Éste funciona según el principio de límites máximos y comercio de derechos.

A las instalaciones a las que aplica, se les establece un límite sobre la cantidad de gases invernadero que pueden emitir. Dentro de este límite, las empresas reciben o compran derechos de emisión que pueden comercializar entre sí según convenga.

Al final de cada año, cada empresa debe entregar suficientes derechos para cubrir todas sus emisiones ya que, en caso contrario, se les imponen fuertes sanciones. En el caso de que una empresa reduzca sus emisiones, puede conservar sus derechos sobrantes para cubrir necesidades futuras, o bien venderlas a otra empresa que no tenga suficientes.

La participación en el RCDE UE es obligatoria para las siguientes actividades: centrales térmicas, cogeneración, otras instalaciones de combustión de potencia térmica superior a 20MW (calderas, motores, compresores...), refinerías, coquerías, siderurgia, cemento, cerámica, vidrio y papeleras.

Alguno de los objetivos que pronostican y pretenden dar alcance son los siguientes:

- En 2020, las emisiones de sectores cubiertos por el sistema serán un 21% más bajas que en 2005.
- En 2030, se pretende conseguir una reducción del 43% de emisiones de gases de efecto invernadero.

4. Monitorización de consumos

Se ha comentado anteriormente, la necesidad de contar con un software de gestión energética, que permita conocer los consumos de la actividad que se lleva a cabo y poder actuar sobre ellos para reducirlos. En este apartado se muestran los elementos que forman parte de una instalación para monitorizar consumos, y en particular, se verán los elementos del caso estudio: el edificio del Campus Sud ETSEIB.

4.1. Elementos de monitorización

El estudio de los elementos de la monitorización se ha realizado sobre modelos de la empresa Circutor que ha sido la proveedora de la Universidad. Pese a que cada fabricante tiene sus productos, la forma de recoger los datos no dista mucho unas de otras.

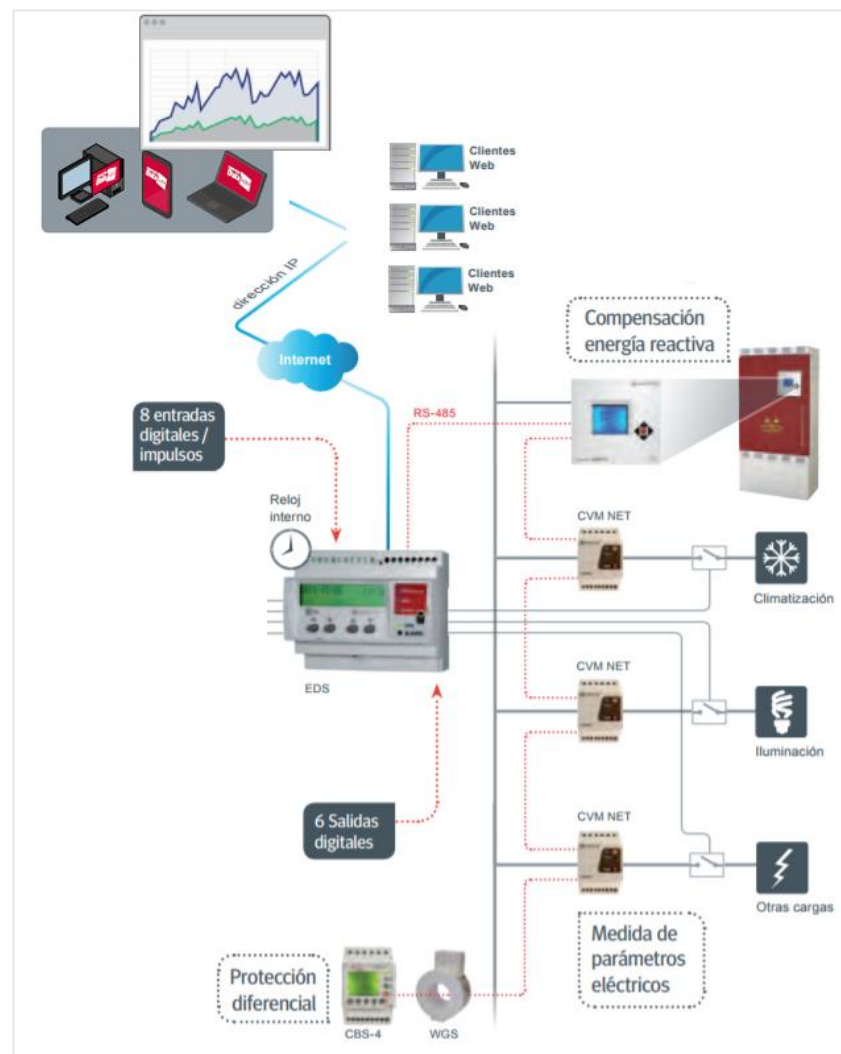


Figura 4.1 Esquema de instalación (Fuente: <http://circutor.es/es>)

Concentrador de datos

La utilización del concentrador de datos es el pilar en el que se basa la instalación y está constituido generalmente por un autómatas. En el caso particular de la ETSEIB, el elemento utilizado es de la serie EDS de Circutor.

Es el encargado de almacenar los datos que le llegan de los diferentes analizadores o contadores y transferirlos al software PowerStudio SCADA. Es capaz de almacenar datos a través de su memoria interna, ofreciendo una mayor robustez al sistema, evitando pérdida de datos en caso de fallo en las comunicaciones con el Servidor Central. Recibe los datos de los diferentes analizadores a través de su bus RS-485 y los envía al Servidor Central mediante la salida RJ-45 hasta la conexión Ethernet.

Dispone de salidas digitales con relé programable que permiten actuar en otros sistemas, como puede ser apagar o encender la climatización del edificio, activar o desactivar contactores de líneas de alumbrado, etc. Además, se puede configurar para que a partir de determinadas situaciones, se generen alarmas que pueden ser enviadas a un buzón de correo electrónico.



Figura 4.2 Concentrador EDS (Fuente: <http://circutor.es/es>)

En resumen, el EDS (*Efficiency Data Server*), es un concentrado de datos que permite cambiar el protocolo de comunicación a la información recibida de los analizadores de red y permite al usuario la consulta de cualquier variable eléctrica.

Las principales características de este autómatas incluyen [9]:

- Parametrización y gestión de eventos automáticos.
- Sistema de registro de alarmas y gestión de eventos del sistema.
- Alarmas enviables vía e-mail.
- Puerto RS-485 para conectar hasta a 5 equipos Circutor.

- Conexión Ethernet RJ-45.
- Centralización de consumos por impulsos.

Por último, comentar que el proveedor cuenta con otro modelo, el EDS Deluxe, que además de las características del modelo estándar, permite conectarse con equipos de medida y control que no sean de la marca Circutor.

La instalación cuenta con una unidad EDS.

Analizadores de red

Los analizadores de redes de Serie CVM [10] de Circutor son centrales de medida de alta precisión, cuyo fin es el control y la supervisión de los principales parámetros eléctricos en redes monofásicos y/o trifásicos, de tres o cuatro hilos (en BT o MT).

La medida se realiza en Verdadero Valor Eficaz, mediante tres entradas de tensión y neutro, y tres entradas para la conexión de transformadores de corriente exteriores, con secundarios.../5ª ó.../1ª. El valor RMS es calculado de la siguiente forma:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum S^2}{n}} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Donde:

- S: Valor de la muestra
- n: número de muestras

Además de mostrar por display y transmitir por comunicaciones todas las magnitudes eléctricas medidas y/o calculadas, incorporan la función contador, siendo capaces de almacenar en su memoria interna la energía consumida y generada de la instalación, incluso ante la ausencia de alimentación auxiliar.

Según el tipo, los analizadores de redes CVM se les puede integrar la función discriminador horario mediante una programación previa, obteniendo así, un totalizador de kWh por cada una de las tarifas indicadas. Estos analizadores registran datos de parámetros tales:

- Potencia activa consumida instantánea (kW)
- Energía activa consumida en un período (kWh)
- Potencia reactiva capacitiva e inductiva consumida instantánea (kvarC y kvarL)
- Energía reactiva capacitiva e inductiva consumida instantánea (kvarCh y kvarLh)

- Factor de potencia
- Distorsión armónica

En la siguiente tabla se muestran las zonas de análisis y los dispositivos de la serie CVM empleados:

Zona	Analizador		Zona	Analizador
Batería 1	CVM-MINI		H-1 -2	CVM-MINI
Batería 2	CVM-MINI		H-1 Materiales	CVM-MINI
C Prima	CVM-MINI		H 0	CVM-MINI
I -1 Gimnasio	CVM-MINI		H 0 Calefacción	CVM-MINI
I 0 I -1	CVM-MINI		H 1	CVM-MINI
I 1	CVM-MINI		H 1 Bar	CVM-MINI
I Clima Biblioteca y S. Actos	CVM-MINI		H 1 Clima	CVM-MINI
L	CVM-MINI		H 1 Informática	CVM-MINI
B -1 L Común	CVM-MINI		H2	CVM-MINI
B Alumbrado	CVM-MINI		H3	CVM-MINI
B Força 1	CVM-MINI		H4	CVM-MINI
B Força 2	CVM-MINI		H5	CVM-MINI
C Alumbrado	CVM-MINI		H6	CVM-MINI
C Força	CVM-MINI		H7	CVM-MINI
D -1 Tec. Meca	CVM-MINI		H8	CVM-MINI
D Alumbrado	CVM-MINI		H9	CVM-MINI
D Força	CVM-MINI		H10	CVM-MINI
E Alumbrado	CVM-MINI		H11	CVM-MINI
E Força 1	CVM-MINI		H Cubierta telefonía	CVM-MINI
E Força 2	CVM-MINI		L Alumbrado	CVM-NRG 96
F Alumbrado	CVM-MINI		L Força	CVM-NRG 96
F Força	CVM-MINI		L Clima	CVM-NRG 96
G -1 Ala Norte	CVM-MINI		LS5 y Ls6 Alumbrado	CVM-NRG 96
G Alumbrado	CVM-MINI		LS5 y LS6 Força	CVM-NRG 96
G Força 1	CVM-MINI		LS5 y LS6 Clima	CVM-NRG 96
G Força 2	CVM-MINI		Trafo 1	CVM-NRG 96
Ascensores	CVM-MINI		Trafo 2	CVM-NRG 96
H -1 Dispensario	CVM-MINI		Trafo 3	CVM-NRG 96

Tabla 4.1 Listado de elementos de la instalación

Se ha recurrido a 47 unidades del analizador CVM-MINI, ideal para redes trifásicas y para montaje en soporte tipo carril DIN gracias a sus reducidas dimensiones.



Figura 4.3 Analizador de red CVM-MINI (Fuente: <http://circutor.es/es>)

También se dispone de 9 unidades de CVM-NRG 46 para los 3 transformadores y las nuevas aulas del pabellón LS. Éste otro modelo puede ser colocado directamente en pared.



Figura 4.4 Analizado de red CVM-NRG 45 (Fuente: <http://circutor.es/es>)

Transformadores de corriente:

Estos elementos son los encargados de proporcionar los datos de corriente utilizada por cada fase al analizador de red. Son imprescindibles para el correcto funcionamiento de los CVM.

Dado que la corriente nominal que circula por las líneas es muy elevada, el transformador convierte esta corriente en valores más bajos para que pueda ser leída por el analizador de redes. La elección de este modelo viene dado por las características de la instalación:

- Tipo de acometida: trifásica o monofásica.
- Rango de amperaje: existen transformadores de corriente que engloban un rango desde 40 a 4000 A

En la instalación de estudio, los transformadores utilizados han sido de tipo toroidal.



Figura 4.52 Transformador diferencial serie WN toroidal (Fuente: <http://circutor.es/es>)

Sistema de control:

Todos estos elementos son controlados vía software a través de un servidor local o bien mediante un servidor remoto con el software PowerStudio SCADA como integrador de todo el sistema. Está orientado a operar vía internet para dar servicio a múltiples clientes con una sola licencia.

El software permite visualizar los datos de los componentes en tiempo real a través de pantallas diseñadas a medida. En estas pantallas se pueden mostrar gráficos 3D del edificio y distintas configuraciones.

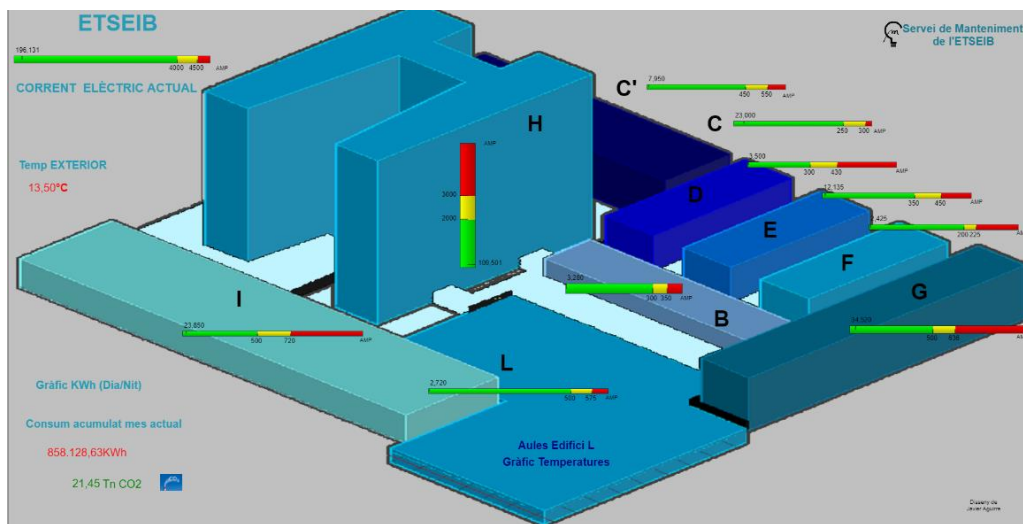


Figura 4.6 Interfaz software Circutor implantado en ETSEIB (Fuente: <http://circutor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

En la interfaz del software de la ETSEIB se puede visualizar la corriente actual en cada edificio, la temperatura exterior, el consumo acumulado del edificio y la equivalencia en CO₂. Todos

estos parámetros pueden ser modificables.

La manera de mostrar los valores de cada variable es parecida al visualizador de SIRENA, permite seleccionar la zona/dispositivo a analizar siempre. Sólo permite seleccionar un único dispositivo.

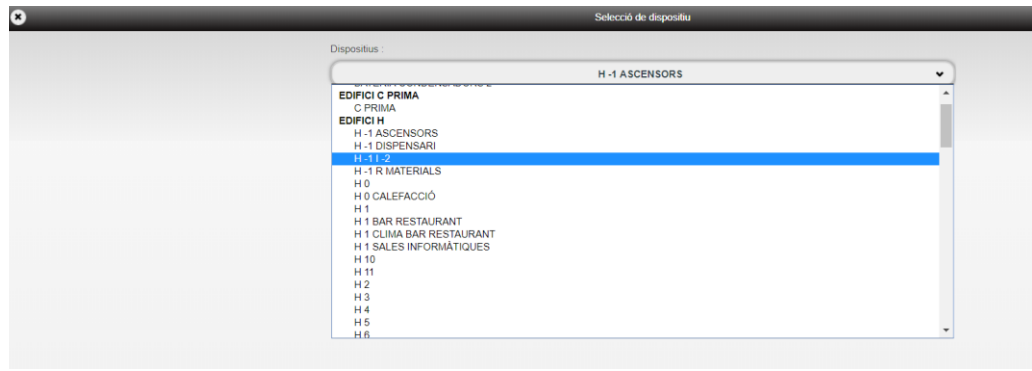


Figura 4.7 Menú selección de dispositivo (Fuente: <http://circuitormante.upc.edu/html5/index.html>)

Lo siguiente es elegir las variables a observar. Uno de los aspectos interesantes es que permite escoger más de una variable, pudiendo superponerlas y comparar la evolución.

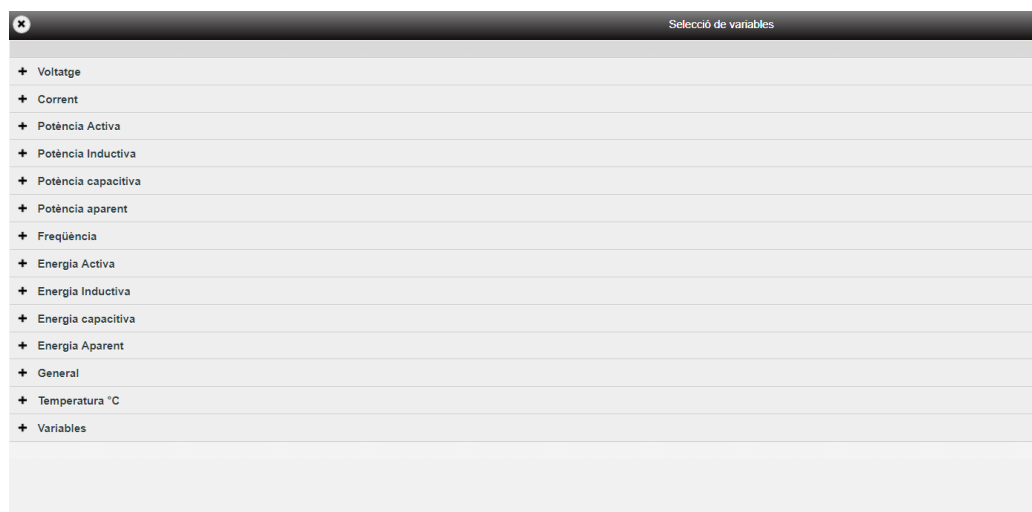


Figura 4.8 Menú selección de variables (Fuente: <http://circuitormante.upc.edu/html5/index.html>)

Igual que SIRENA, se selecciona el intervalo a analizar.

Figura 4.3 Elección de período (Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

También permite realizar integraciones en periodos que van de un mes a 15 minutos. En este aspecto, se echa en falta poder integrar todo un año, como sí permite SIRENA.

Data/hora	H-1 ASCENSORS Current III (A)
01/01/2017 00:00:00	4.367
02/01/2017 00:00:00	5.179
03/01/2017 00:00:00	6.178
04/01/2017 00:00:00	6.367
05/01/2017 00:00:00	6.933
06/01/2017 00:00:00	7.49
07/01/2017 00:00:00	7.683
08/01/2017 00:00:00	7.751
09/01/2017 00:00:00	13.677
10/01/2017 00:00:00	12.568
11/01/2017 00:00:00	13.494
12/01/2017 00:00:00	13.298
13/01/2017 00:00:00	13.084
14/01/2017 00:00:00	7.689
15/01/2017 00:00:00	7.634
16/01/2017 00:00:00	13.867
17/01/2017 00:00:00	12.738
18/01/2017 00:00:00	14.558
19/01/2017 00:00:00	14.755
20/01/2017 00:00:00	12.834
21/01/2017 00:00:00	7.834
22/01/2017 00:00:00	7.773
23/01/2017 00:00:00	13.947
24/01/2017 00:00:00	14.364
25/01/2017 00:00:00	15
26/01/2017 00:00:00	14.003
27/01/2017 00:00:00	12.724
28/01/2017 00:00:00	7.503
29/01/2017 00:00:00	7.573
30/01/2017 00:00:00	14.818
31/01/2017 00:00:00	13.138
01/02/2017 00:00:00	12.562

Figura 4.10 Selección de la integración (Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

Seguidamente permite la visualización en forma de gráficas de las variables seleccionadas.

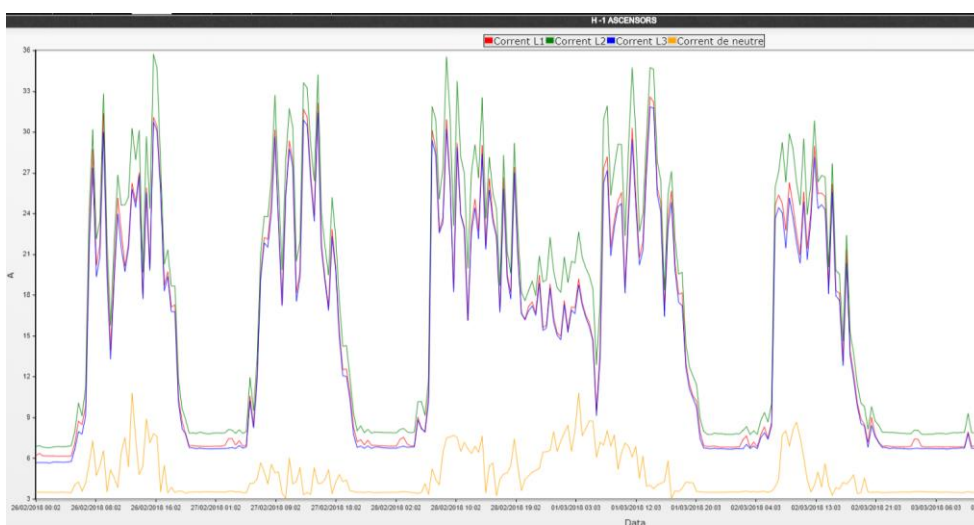


Figura 4.11 Visualización de variables en formato gráfico (Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

Sin embargo, uno de los mayores hándicaps que presenta este programa es la exportación de datos ya que no cuenta con una manera intuitiva de hacerlo. No existe ningún comando para exportar a formato .xls o .csv, ni permite realizar una selección de los valores a copiar con el cursor; únicamente permite visualizar los valores en pantalla y los gráficos. Para la realización de este proyecto, se ha optado por exportar el contenido de la web a URL y adecuarlo posteriormente a .xls para poder ser tratado.

Otra de las propiedades del software es la capacidad para gestionar sucesos y alarmas que se generen en las instalaciones, permitiendo enviar e-mails o SMS de alerta, o bien abrir y cerrar un para encender o apagar parte de la instalación.

También cuenta con servicios XML con tal de posibilitar la comunicación con otras aplicaciones. El motor de comunicaciones del software actúa como un servidor web, sirviendo los datos en tiempo real, informes, gráficos, etc, a través de un Applet Java. Gracias a eso, los clientes pueden conectarse al aplicativo simplemente a través de un navegador estándar (Explorer, Firefox o Google Chrome) y teniendo una versión de Java actualizada.

5. Caso práctico: Estudio energético de la ETSEIB

En este apartado se pretende realizar un estudio en profundidad de la situación actual del edificio, identificando posibles puntos de mejora. Para ello se, se explica la metodología que se ha seguido y las herramientas utilizadas.

5.1. Análisis de consumos

Para la extracción de datos eléctricos, se ha recurrido al Sistema Sirena UPC y al PowerStudio de Circutor. El propósito es realizar una comparativa entre los parámetros medidos en 2016 y 2017 para poder realizar una comparativa y analizar la evolución.

Así, los datos extraídos han sido:

- Consumo de energía activa diario durante el año del total de la escuela. Esto permite observar el factor estacional y ocupacional en el consumo energético.
- Consumo de energía activa horario durante el año del total de la escuela. De igual forma que en el anterior caso, se podrá observar la influencia climática y ocupacional, pero además permitirá observar consumos residuales en horas de no actividad. Esta visualización permite observar las tendencias de consumo durante las diferentes épocas del año, así como detectar consumos residuales.
- Consumos de energía activa mensual por planta del edificio H por planta. Este dato permite realizar un análisis más preciso para identificar y asociar eventos en las diferentes plantas del edificio H.

Para la extracción de consumos globales del edificio se ha utilizado la herramienta SIRENA, que permite hacer discriminación entre los diferentes Campus de la UPC. Así, seleccionando los puntos de consumo a visualizar, en este caso los tres transformadores la escuela; y el período a observar, el software permite descargar los datos a formato .xls y elegir si las integraciones son cuarto horarias, horarias, diarias o mensuales.

Datos de consumo

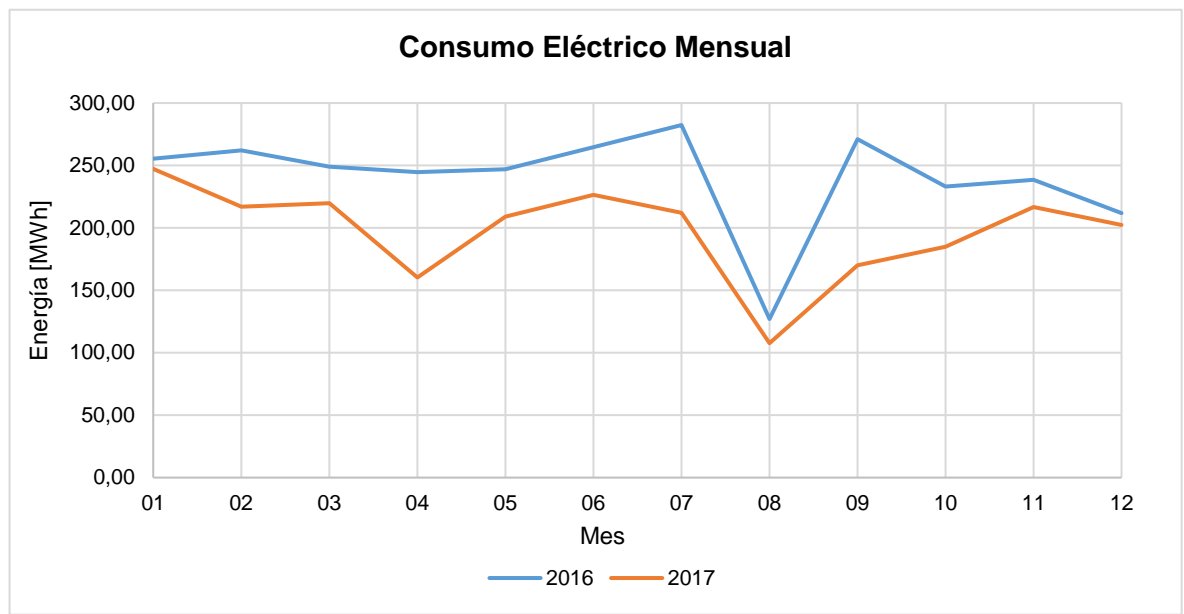


Figura 5.1 Comparativa 2016-2017 del consumo eléctrico mensual

En la comparativa de la figura 5.1 se puede observar una diferencia significativa en los consumos eléctricos de un año y otro. La curva anual de 2017 siempre está por debajo de la de 2016, parece que se ha conseguido disminuir el consumo tanto en invierno como en verano, por lo que la reducción parece encajar en el *Pla UPC Energia 2020*. El gráfico permite ver a simple vista un consumo mayor en los meses de verano e invierno, debido al uso de calefacción o aires acondicionados. La caída drástica del consumo coincide con el mes (agosto) de desocupación del edificio. Aunque el consumo no es 0, se ha conseguido reducir de manera significativa el consumo en este periodo.

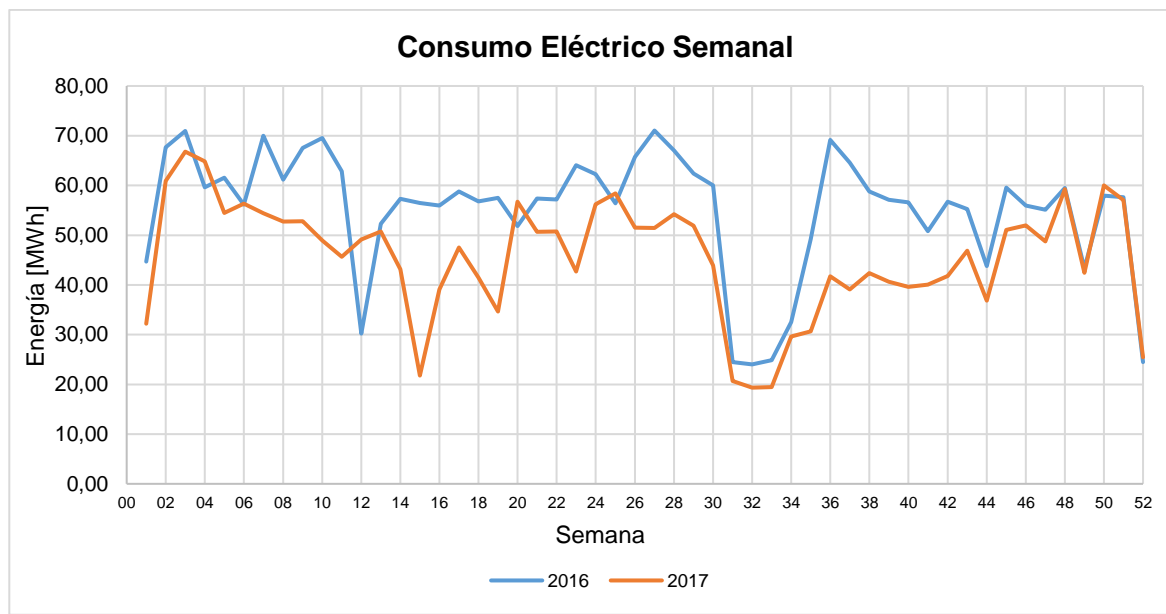


Figura 5.2 Comparativa 2016-2017 del consumo eléctrico por semanas

Si se añade más precisión y se analiza por semanas, se puede observar con más precisión esta reducción de un año a otro. Primero se puede ver con claridad que el factor más determinante en el consumo es la ocupación de la escuela: en ambos años se producen 3 descensos en el consumo debidos a los periodos vacacionales de Navidad (S52 a S2), Semana Santa (S12 en 2016 y S15 en 2017) y verano (S31 a S35). Lo que se adivinaba en la gráfica mensual, se confirma en la semanal: la reducción de consumos durante las 4 semanas de Agosto es del orden de 5 MWh.

Por otro lado, la mayor reducción de consumo se consigue entre las semanas 35 y 44. Este período corresponde a los meses de septiembre y octubre, inicio del otoño. Un factor condicionante podría ser el climático, y es que cada año se extiende más el verano y se retrasa la entrada del otoño, manteniendo temperaturas agradables hasta prácticamente el mes de noviembre.

Otro de los aspectos que permite monitorizar el software es la temperatura de la zona, en este caso se han importado los valores de temperatura media de Barcelona.

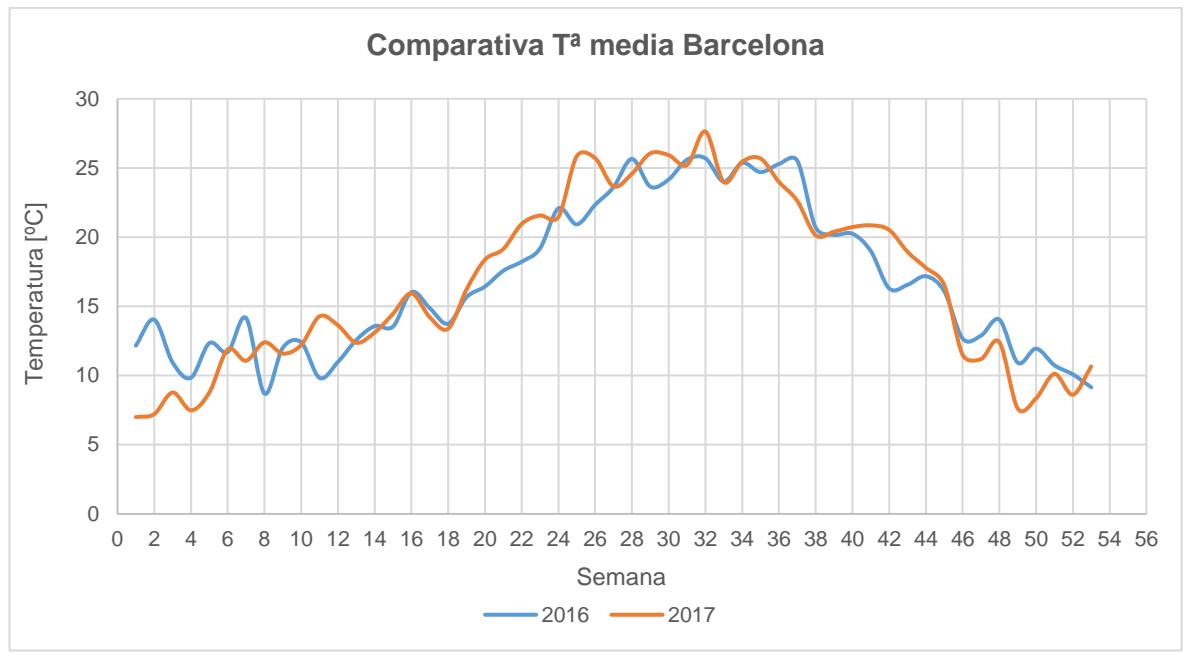


Figura 5.3 Comparativa 2016-2017 de la temperatura media en Barcelona

En la figura 5.3, se observa el fenómeno comentado anteriormente especialmente entre las semanas 38 y 44. Puede haber ayudado a retrasar el uso de climatización en algunas partes del edificio.

Otra de las virtudes que ofrece el sistema de monitorización con esta configuración es la de poder analizar consumos por separado. Es decir, permite observar qué áreas o departamentos conllevan un gasto energético mayor o quiénes han conseguido una evolución positiva. Para realizar esta discriminación, se utiliza el software PowerStudio, integrado en SIRENA.



Figura 5.4 Listado de salidas que monitoriza PowerStudio (Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

En la imagen 5.4, se pueden observar los diferentes puntos de toma de datos de la escuela distribuidos por pabellones.



Figura 5.5 Cuadros de distribución representados en PowerStudio. Salidas QGBT 1,2 y 3 (Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

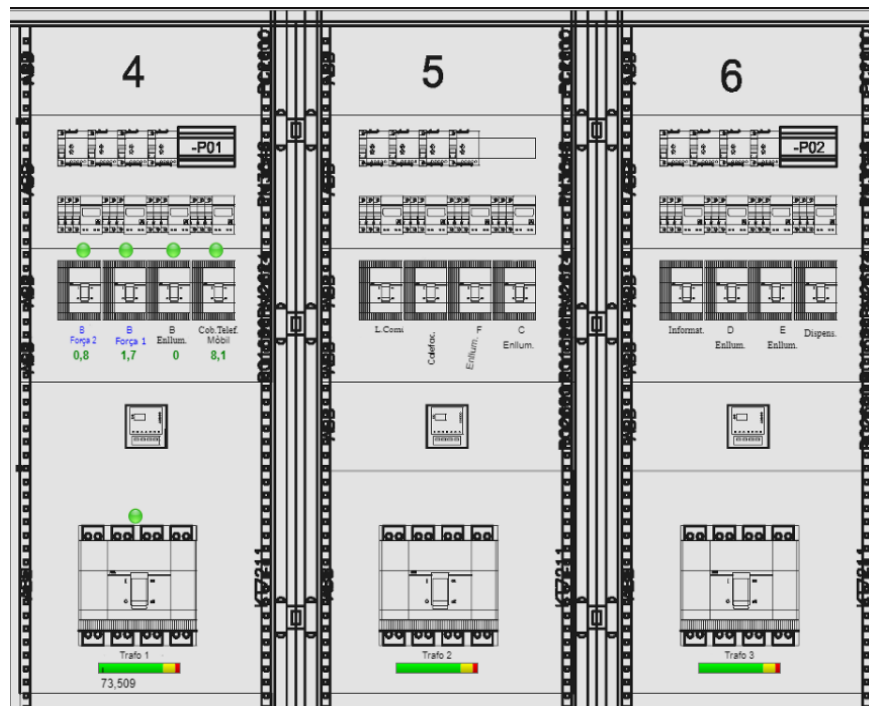


Figura 5.6 Cuadros de distribución representados en PowerStudio. Salidas QGBT 4,5 y 6
(Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

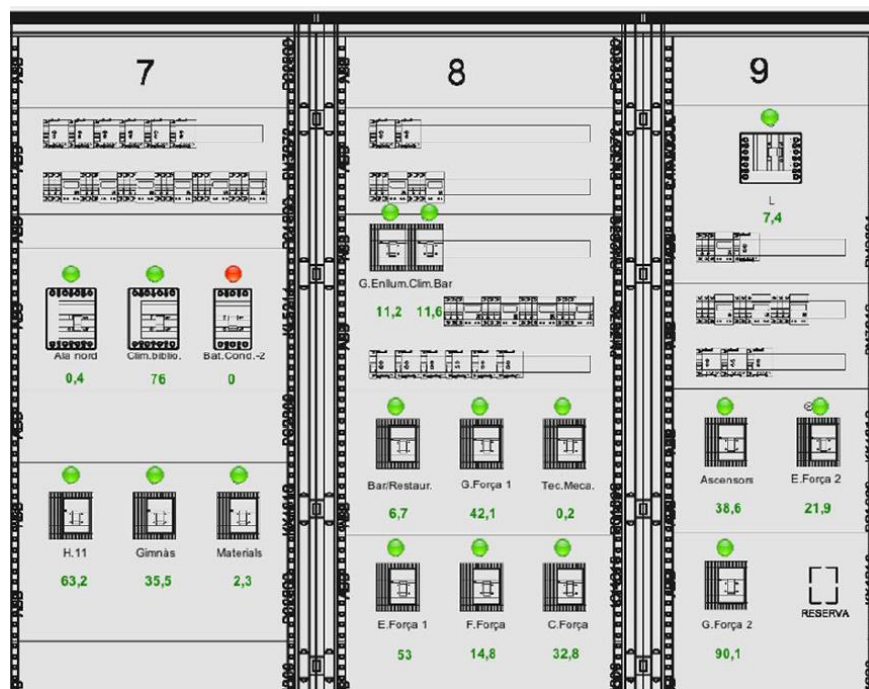


Figura 5.7 Cuadros de distribución representados en PowerStudio. Salidas QGBT 1,2 y 3
(Fuente: <http://circuitor-mante.upc.edu/html5/index.html>)

Se pasa ahora a estudiar el consumo energético del edificio H.

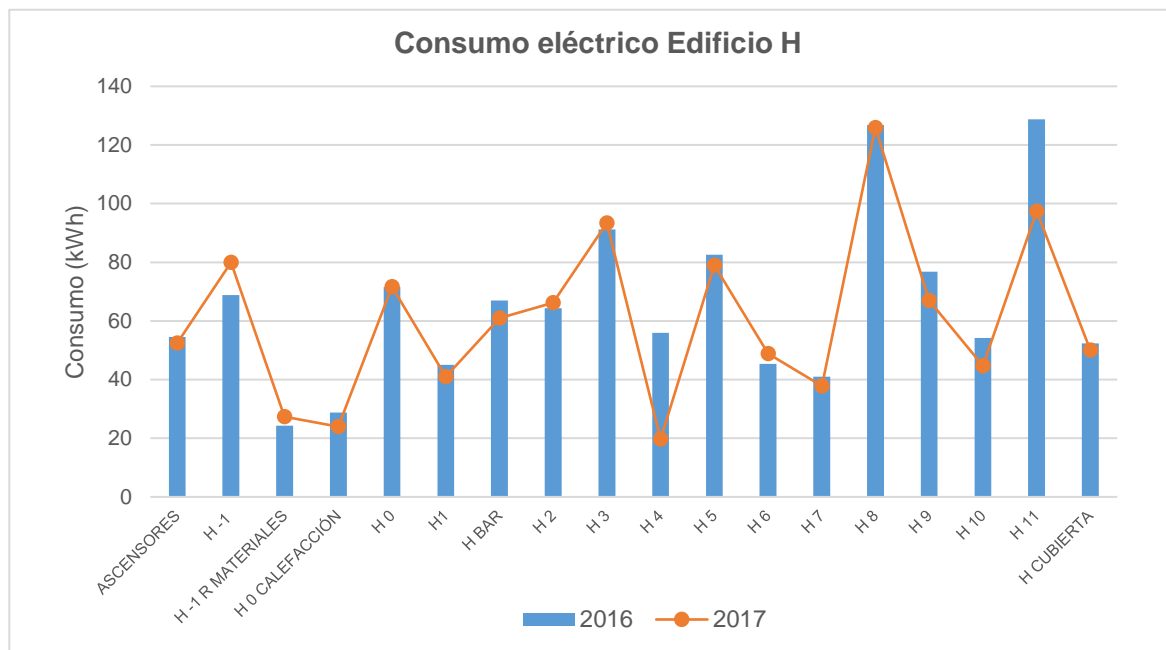


Figura 5.8 Comparativa 2016-2017 del consumo eléctrico en las diferentes plantas del edificio H

De la figura 5.8 se pueden extraer algunas conclusiones.

Por un lado, se observa que las plantas 8 y 11 del edificio son las que mayor consumo reportan. Este hecho es debido a que en la planta 8 se ubica el centro de cálculo de la escuela y parte de los servidores que han de ser refrigerados por equipos de aire acondicionado que trabajan durante las 24 horas del día. En el caso de la planta 11 se ubican laboratorios del IOC (*Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials*) que representan puntos de consumo elevado. Les siguen la planta 3 que cuenta con un gran número de aulas, la planta 5 que prácticamente en su totalidad dispone de aulas informáticas y la planta -1 donde se ubican algunos de los laboratorios de la escuela.

En cuanto a la línea evolutiva, es llamativa la reducción que se consigue en la planta 11, ya que consigue reducir de forma significativa sus consumos. Esta reducción tan brusca en una planta dedicada a investigación puede ser debido a una reducción en la participación de proyectos durante el año 2017.

Por el contrario, se ven aumentos de consumo en las plantas -1. Se trata de plantas dedicadas a laboratorios, por lo que habría que estudiar si el incremento ha sido debido a un mayor número de horas lectivas y alumnos, o realmente no se ha sabido controlar el consumo.

Para el resto de edificios de la escuela, la evolución es la siguiente:

2016 (MWh)	2017 (MWh)	Ahorro
1.179,405	1.087,472	7,76%

Tabla 5.1 Resumen de consumo en edificio H

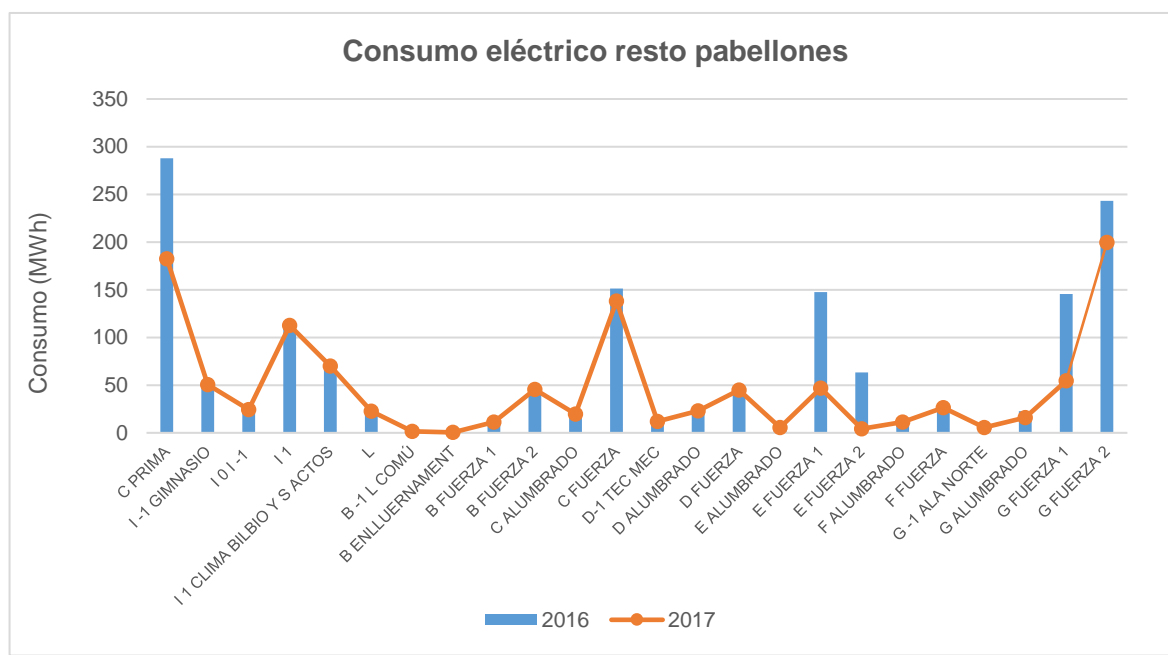


Figura 5.9 Comparativa 2016-2017 del consumo eléctrico del resto de pabellones

La configuración de la instalación permite discriminar los consumos de los pabellones B, C, D, E, F y G en el consumo correspondiente al alumbrado y el consumo correspondiente a cargas conectadas a enchufes (FUERZA).

En la figura 5.9, se puede observar que la línea evolutiva ha sido positiva en cuanto a ahorro. Destacan los ahorros conseguidos en los pabellones C', E y G. El caso del edificio C' puede ser debido en gran parte a la ausencia del Departamento de Nanotecnología durante el año 2017.

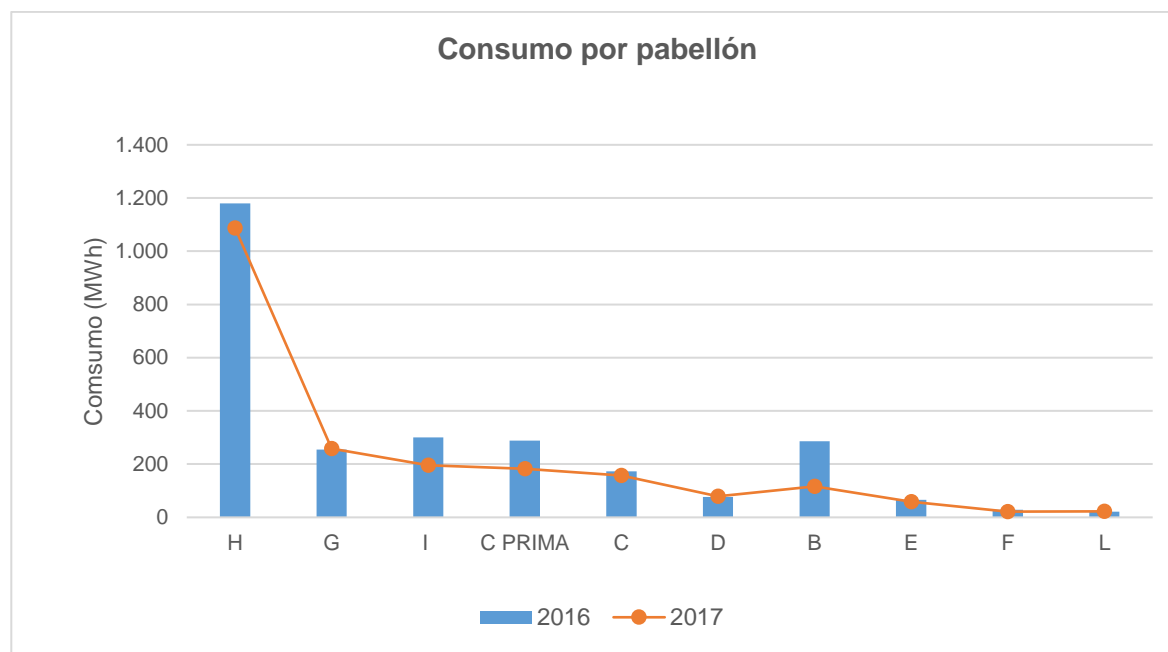


Figura 5.10 Comparativa 2016-2017 del consumo eléctrico por pabellón

En la figura 5.10, se pueden ver los consumos agrupados por pabellones y ordenados según consumos de 2017 de mayor a menor. El edificio H se muestra como el pabellón con más actividad, seguido por el G, constante en cuanto a evolución, y el I que consigue una reducción importante. Es llamativo el ahorro conseguido en el pabellón B, dado que es uno de los más nuevos y con más afluencia de estudiantes.

Pabellón	2016 (MWh)	2017 (MWh)	Ahorro
H	1179,405	1087,472	● 7,79%
G	255,05	257,82	● -1,09%
I	299,98	195,46	● 34,84%
C'	287,80	182,37	● 36,63%
C'	173,12	157,58	● 8,98%
D	76,93	79,56	● -3,42%
B	286,23	115,88	● 59,52%
E	66,43	59,22	● 10,86%
F	28,55	21,54	● 24,57%
L	21,10	22,65	● -7,32%
Total	2.674,60	2.179,54	● 18,51%

Tabla 5.2 Resumen de consumos de todos los pabellones de la escuela

Otro análisis que se ha llevado a cabo ha sido observar el comportamiento del edificio hora a hora para los 365 días del año. Para ello, se han importado los datos de consumo de SIRENA para todo un año con integraciones horarias. A continuación, se ha dividido por períodos de la siguiente manera:

- Verano/Invierno: La discriminación se ha establecido según las fechas de cambio de hora. Así, el horario de verano empezará el 26 de marzo de 2017 y terminará el 29 de octubre de 2017. El invierno recogerá el resto del período.
- Lectivo/ No Lectivo: Se considera lectivo el período en que se imparte clase en la escuela según el calendario académico 2016-2017 y 2017-2018. Los períodos no lectivos abarcan fines de semana, festivos, parones vacaciones y temporada de exámenes.

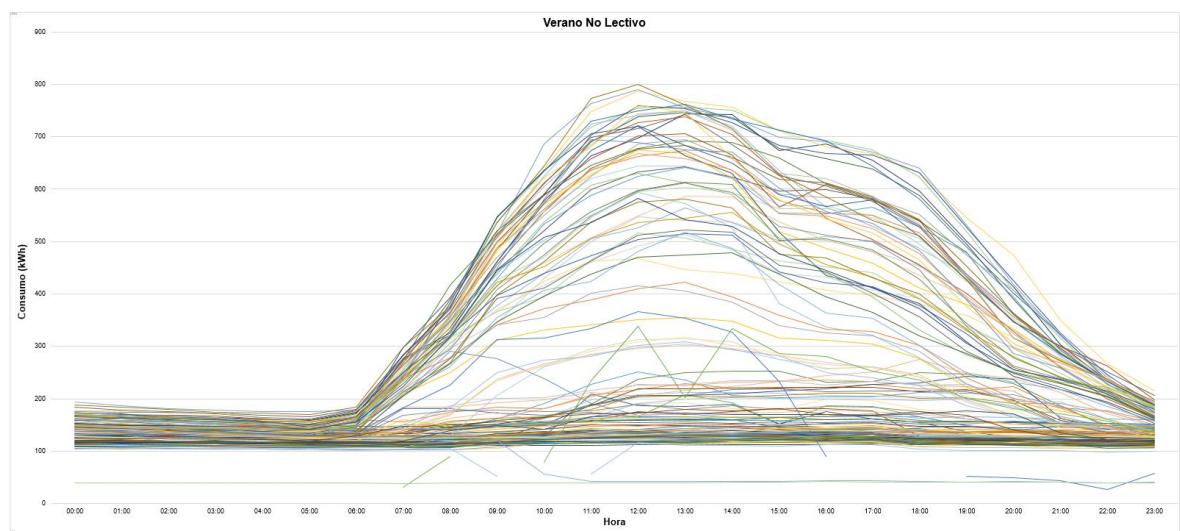


Figura 5.11 Consumo horario en período verano-no lectivo

Por un lado, se muestra el horario de funcionamiento de la escuela, siendo éste de 6 a 21 aproximadamente. Por otro lado, en este período se observan dos claras tendencias de comportamiento: la primera correspondiente a los fines de semana y festivos del horario de verano en que el consumo se mantiene prácticamente constante a lo largo del día y por debajo de los 200 kWh; la segunda corresponde a aquellos días en que, pese a que no se imparten clases, se realizan exámenes finales o reevaluaciones. En este segundo grupo, se observa como el pico de consumo se produce a las 12 horas, llegando incluso a los 800 kWh, un descenso a las horas de comer y un segundo repunte sobre las 18 horas de menos demanda.

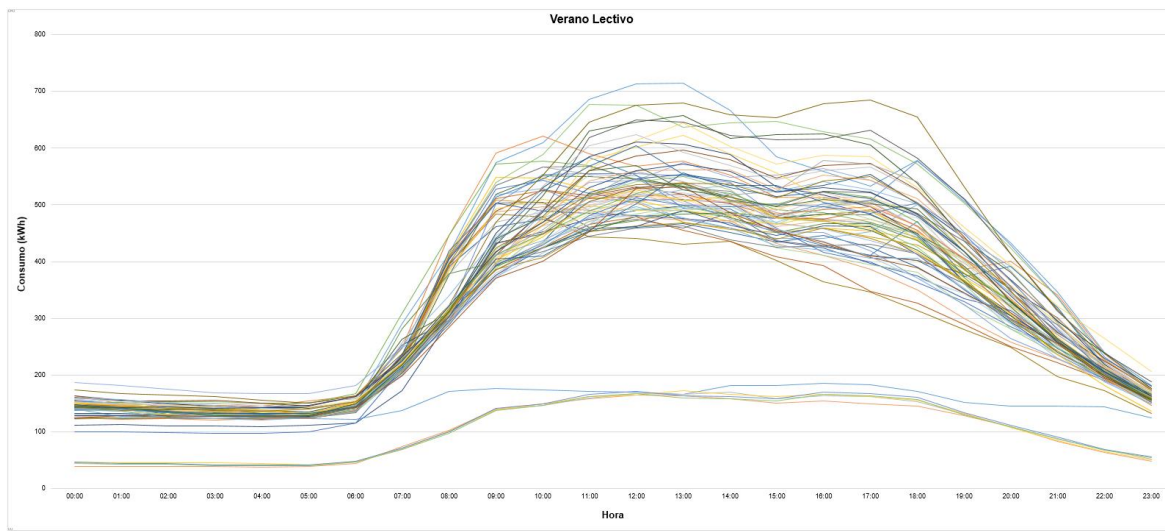


Figura 5.12 Consumo horario período verano-lectivo

Para el período verano-lectivo, la tendencia es mucho más homogénea. La demanda energética para el horario de actividad sigue el mismo patrón con pico a las 12 y repunte a las 18 horas, pero en este período es bastante similar. Las curvas más “altas” corresponden a los días más calurosos (finales de mayo y principios de septiembre) en los que se hace más uso de equipos de acondicionamiento. Se distingue también un grupo de 3-4 días, correspondientes al mes de octubre, en los que la demanda energética no supera los 200 kWh que no deben ser considerados porque no reflejan la realidad y es probable que sean debidos a un fallo en los reportes de consumo.

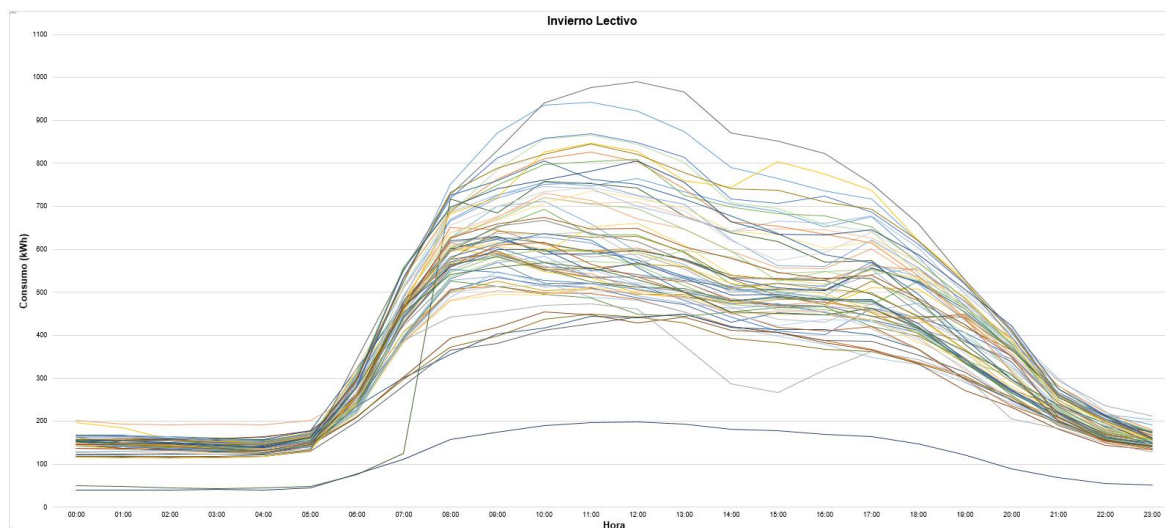


Figura 5.13 Consumo horario período invierno-lectivo

En la discriminación invierno-lectivo de la figura 5.13, se observa un patrón semejante al anterior período, pero con valores más elevados de consumo. Así, para las horas pico, existen

varias curvas que sobrepasan los 700 kWh, coincidiendo con los meses más fríos como son diciembre y febrero. Los consumos residuales en horas de inactividad, siguen estando entre los 100 y 200 kWh.

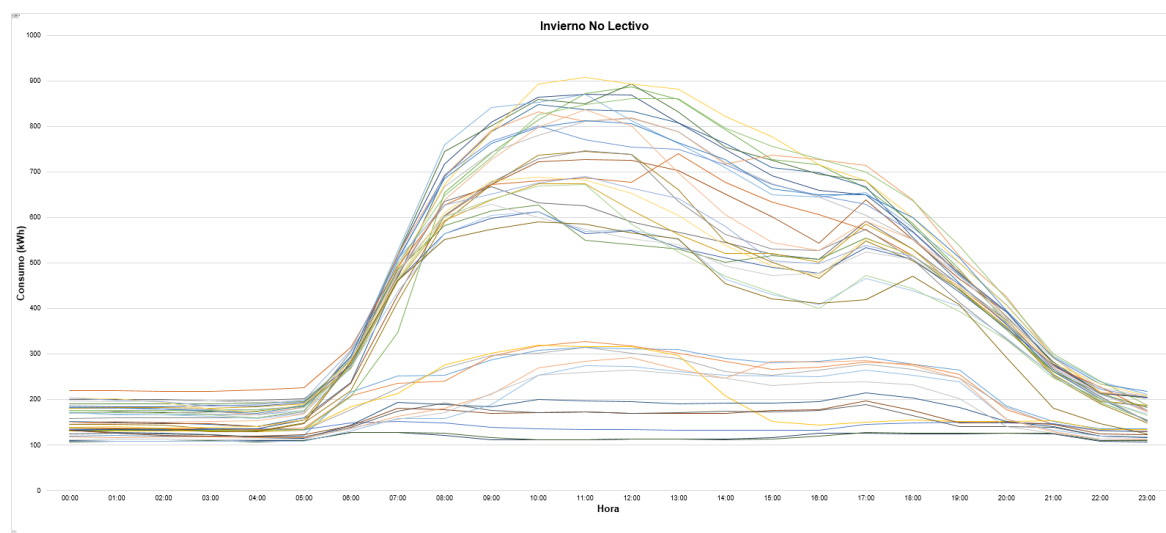


Figura 5.14 Consumo horario período invierno-no lectivo

En la última discriminación, correspondiente al período invierno-no lectivo, se pueden apreciar hasta tres tendencias diferentes. Por un lado, se observan las curvas de más demanda que corresponden a la época de exámenes finales de enero. También se observan las curvas que se mantienen con consumos casi constantes entre los 100 y 200 kWh, que corresponden a los fines de semana de invierno. Por último, hay una serie de días que tienen una curva con forma de “actividad” pero con valores pico de 300 kWh, que se puede relacionar con aquellos días en que los estudiantes acuden a la escuela a preparar los exámenes finales.

Este análisis permite conocer los momentos de más demanda energética, así como los consumos residuales. Uno de los objetivos del personal de mantenimiento es saber de cuánto son esos consumos residuales y poder identificar las fuentes de consumo.

		Verano [kWh]		Invierno [kWh]	
		Lectivo	No Lectivo	Lectivo	No Lectivo
Horas Pico	Max	715,17	800,28	990,88	907,30
	Min	400,66	110,26	182,20	108,31
	Promedio	516,86	308,08	590,59	340,66
Residual	Max	264,14	266,62	202,61	241,00
	Min	109,46	98,14	114,81	106,48
	Promedio	149,74	138,69	145,85	146,71

Tabla 5.3 Resumen consumos según período

En la tabla 5.3 se muestra un resumen de valores obtenidos en este análisis. Se puede observar que los períodos con consumos picos (de las 10 a las 14 horas) más elevados equivalen a la temporada de invierno, tanto lectivo como no lectivo. Sin embargo, el consumo más elevado promedio en las horas pico corresponde a los períodos lectivos, tanto en verano como invierno. Llama la atención la evolución del consumo residual (22 a 6 horas) promedio para los diferentes períodos, siendo el mayor en verano-lectivo, provocado probablemente por mantener equipos de climatización encendidos durante la noche.

Un objetivo a alcanzar podría estar en disminuir ese consumo residual promedio durante todo el año a valores de verano-no lectivo, ya que podrían obtenerse ahorros interesantes.

5.2. Consumo de energía reactiva

Otro aspecto a considerar en la factura eléctrica es la penalización por consumo de energía reactiva. En el presente estudio no se ha podido disponer de las facturas de electricidad emitidas por la compañía eléctrica de la escuela, por lo que se han extraído datos de los consumos de energía reactiva de los transformadores mediante el PowerStudio.



Figura 5.15 Consumo de reactiva del año 2017

La imagen 5.15 muestra una tendencia parecida al consumo de energía activa pero con valores muy por debajo. Como se ha visto en el capítulo 3.2, las compañías eléctricas penalizan si la energía reactiva supera el 33% de la energía consumida en alguno de los períodos de P1 a P5, dejando sin restricciones el P6. A simple vista parece que los consumos de reactiva son muy bajos, pero al mostrarse todos los períodos agregados podría haber excesos camuflados.

El PowerStudio permite discriminar consumos por período. Sin embargo, la discriminación que hay aplicada actualmente es únicamente para tres períodos y no acaba de funcionar bien. De ese modo se comprueba únicamente que la reactiva no supera el 33% de la activa, pese a no ser un análisis preciso.

Tras conversaciones con el responsable de mantenimiento de la escuela se confirma que no existe penalización por reactiva pese a no contar con las baterías de condensadores.

5.3. Optimización de potencia

Para puntos de suministro con potencias de más de 15 kW se está obligado a acudir al Mercado Libre eléctrico para contratar servicios. En este mercado se encuentran una gran variedad de comercializadoras y diferentes modalidades de contrato.

La facturación de un punto de suministro de energía eléctrica en el Mercado Libre se realiza de forma binominal en el sentido que existen claramente dos aspectos: la potencia contratada y la energía consumida. En los apartados 5.1 y 5.2 ya se han analizado los términos energía activa y reactiva, por lo que se pasa a analizar el término de potencia.

La optimización de la potencia se ha convertido en uno de los aspectos fundamentales a la hora de ahorrar en una factura eléctrica. El hecho de tener tanta importancia reside en el incremento de precio que ha sufrido este término fijo a lo largo de los últimos años en comparación al concepto del peaje que se aplica al término variable de energía.

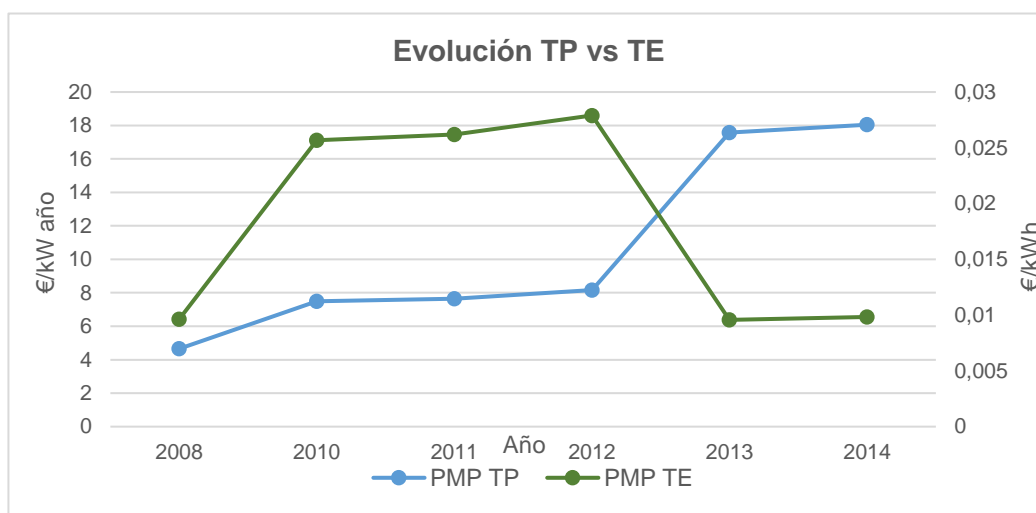


Figura 5.16 Comparativa de los peajes de acceso para el término potencia y el de energía (Fuente: Recopilación de Boletines Oficial del Estado desde 2008)

Se optimiza la potencia a partir de más de 15 kW (tarifas 3.0, 3.1, 6.1 o 6.2) porque es a partir de esta cifra que la compañía eléctrica instala un máxímetro, un dispositivo que registra en el

contador los picos de potencia cada quince minutos. Por debajo de esa potencia, existe el interruptor de control de potencia (ICP) que corta el suministro cuando se sobrepasa la potencia contratada. Evidentemente no se puede optimizar el gasto en una instalación con ICP: a lo sumo se podría recomendar aumentar o disminuir potencia, pero el gasto en este concepto es fijo, independientemente del número de veces que salte.

En tarifas con maxímetro, resulta especialmente interesante controlar los excesos de potencia que puedan originarse y que pueden tener un aspecto relevante en el importe a facturar. Pero no solo hay que controlar los excesos, en muchas ocasiones, las lecturas de maxímetro muestran puntos de suministro que rara vez se acercan a las potencias contratadas, lo que se traduce en un sobrecoste al que no se le saca partido. Es por ello que cobra sentido el realizar un estudio de optimización de potencia. También es importante recalcar que la base de un estudio de optimización de potencia debe contar con las siguientes consignas:

1. Que el año de estudio sea un año típico de funcionamiento, es decir, que la ocupación y uso del edificio haya sido normal, sin exceso ni defectos en su capacidad, pues en caso contrario habría que contemplar un período mayor.
2. Que durante el período a analizar no hayan existido ampliaciones o disminuciones de equipos o maquinaria que puedan alterar el consumo, y lo más importante, que no se prevea que en un plazo corto de tiempo vayan a incorporarse o extraerse equipos en el edificio.

Los estudios de optimización se realizan de dos formas diferentes, según la tarificación.

5.3.1. Tarifas 3.0 y 3.1

El método de optimización es el mismo para tarifas 3.0 que 3.1. El motivo de esto es porque la manera de facturar es idéntica en ambos casos, tal y como se comentó en el apartado 3.2. Así, para la optimización de este tipo de tarifas será necesario disponer de las 12 últimas facturas de las que se necesita extraer la siguiente información:

- a) Potencia contratada para cada uno de los períodos P1, P2 y P3.
- b) Lecturas de maxímetro en cada uno de los períodos P1, P2 y P3.
- c) Precio del término de potencia acordado en cada uno de los períodos P1, P2 y P3. Este precio suele darse en €/kW/año pero se factura mensualmente. En condiciones de Libre Mercado, el valor del término potencia puede ser variable, aunque un gran número de comercializadoras siguen manteniendo los valores fijados en el BOE:

Tarifa	P1 [€/kw/año]	P2 [€/kw/año]	P3 [€/kw/año]
3.0A BOE	40,728885	24,43733	16,291555
3.1A BOE	59,173468	36,490689	8,367731

Tabla 5.4 Término de potencia para tarifas indexadas 3.X (Fuente: Orden ITC 688/2011)

d) Fecha inicio y final del período de facturación.

Disponiendo de esta información ya se puede realizar el estudio. Para ello servirá simplemente una hoja de cálculo Excel:

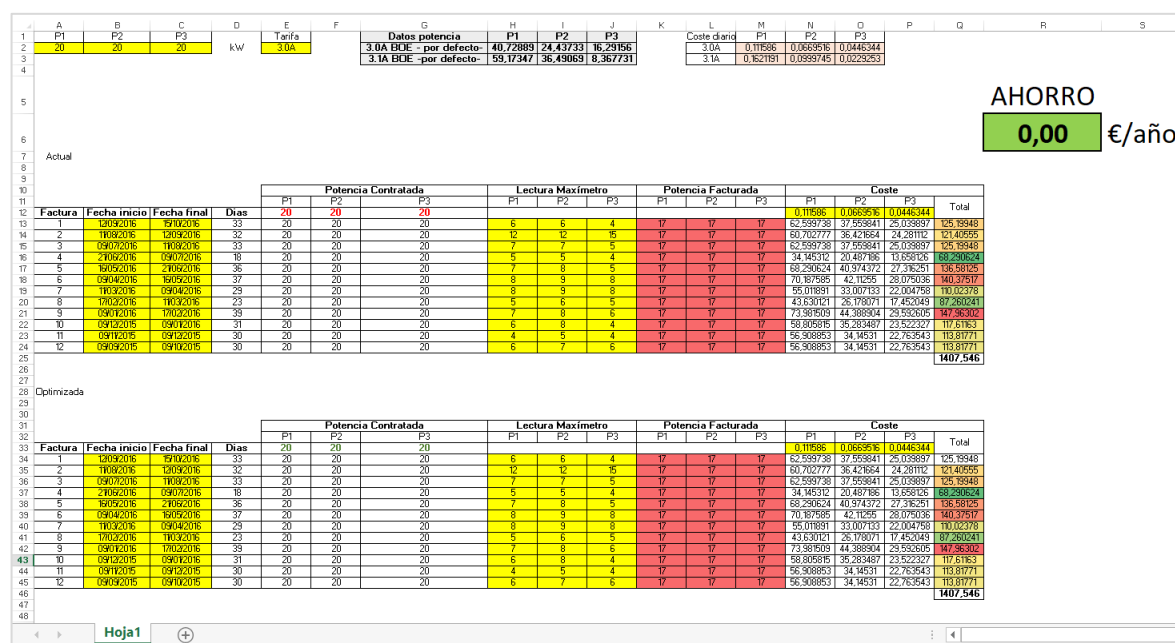


Figura 5.17 Determinación de potencias óptimas para tarifas 3.X

En la figura 5.17, se muestra la hoja de cálculo utilizada para este tipo de optimización. La manera de introducir los datos es sencilla, simplemente introduciremos potencias contratadas, lecturas de maxímetros, tarifa, fechas de facturación y, en caso de haber firmado un contrato con costes de potencia diferentes a los valores BOE, los costes de término potencia firmados (casillas en amarillo).

El fichero calcula para cada período P1, P2 y P3 la potencia a facturar según la lectura de máxímetro y según el RD 11/64. De este modo, se simula el coste mensual del término potencia. En la primera tabla se muestra la situación actual, mientras que en la segunda sería la situación optimizada. El proceso para obtener la potencia óptima es simple, se trata de un algoritmo iterativo en el que la función objetivo es el ahorro, es decir, la diferencia entre el

con datos de otro ejemplo ya que la escuela tiene contratada una tarifa 6.1 A. Como se observa en este ejemplo, las potencias en P1, P2 y P3 han disminuido de 20 kW a 7,8 y 15 respectivamente. Pese que en alguno de los períodos de facturación los valores de maxímetro son superiores a la potencia óptima, en términos globales se consigue un ahorro de 788 €/año. Incluso habiendo de pagar los costes de gestión, la reducción sería interesante.

5.3.2. Tarifas 6.X y caso estudio

Para optimizar la potencia en alta tensión de 6 períodos se requieren los registros cuarto horarios de todos los días de cada período, normalmente de un año. El método para optimizar potencias de 6 períodos se basa en minimizar el coste de potencia a través de inecuaciones. Esto hace que el caso sea más complejo que lo visto en el apartado anterior.

Los problemas de optimización con funciones objetivo y restricciones no lineales se denominan problema de *multiplicadores de Lagrange*, mientras que si ambas son lineales, el problema se denomina *optimización por programación lineal*. En este caso, se trata de un problema de programación no lineal y que se tendrá que resolver mediante un solver.

Se presenta entonces la función objetivo a minimizar, FP correspondiente a la facturación de la parte de potencia:

$$FP = Fp_{(c)} + Fp_{(ep)} \quad \text{Ec. (5.1)}$$

Dónde:

- $Fp_{(c)}$: facturación de la potencia contratada
- $Fp_{(ep)}$: facturación de los excesos de potencia

Estos términos a su vez:

$$Fp_{(c)} = \sum_{i=1}^n t_{pi} \cdot Pc_i \quad \text{Ec. (5.2)}$$

Siendo:

- t_{pi} : el precio anual del término de potencia en período tarifario i.
- Pc_i : la potencia contratada en cada período i.
- n: número total de períodos.

$$FP_{(ep)} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot 1.4064 \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_{dj} - P_{ci})^2} \quad \text{Ec. (5.3)}$$

Siendo:

- k_i : coeficiente relacionado con el período i:

Período	1	2	3	4	5	6
K_i	1	0,5	0,37	0,37	0,37	0,17

- P_{dj} : potencia demandada en el cuarto de hora j-ésimo de período i en que se haya sobrepasado la potencia P_{ci} .
- m: número de cuartos de hora a lo largo del año.

Las restricciones por su parte obedecen también a la normativa:

$$P_1 \leq P_2 \leq P_3 \leq P_4 \leq P_5 \leq P_6 \quad \text{Ec. (5.4)}$$

Para resolver el problema de optimización será necesaria la siguiente información:

- Curva de carga cuarto horaria del punto de suministro. La comercializadora debe proporcionar la curva cuarto horaria de, al menos, el último año natural. Se trata de las medidas de máxímetro de cada cuarto de hora del día a lo largo de los 365 días del año.
- Potencias actuales contratadas para cada período P1, P2, P3, P4, P5 y P6.
- Periodos tarifarios del año de estudio. Esta información se puede descargar directamente de la web de descargas de Red Eléctrica Española [11]
- Precio del término potencia anual acordado con la comercializadora para los períodos P1, P2, P3, P4, P5 y P6. En condiciones de Libre Mercado, el valor del término potencia puede ser variable, aunque un gran número de comercializadoras siguen manteniendo los valores fijados en el BOE.

En el año 2016, a través del equipo *POE (Projectes d'Optimització Energética)*, se realizó una optimización de potencia para los dos CUPS de la ETSEIB. En la siguiente tabla, se puede observar el impacto económico:

	Potencia contratada inicial						Nueva potencia contratada						Ahorro estimado anual
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
ETSEIB Principal	1480	1480	1480	1480	1480	1480	900	900	900	900	900	1480	59.002,56 €
ETSEIB Complementario	1480	1480	1480	1480	1480	1480	900	900	900	900	900	1480	29.501,28 €

Tabla 5.5 Cambios de potencia y previsión de ahorro (Fuente: Responsable de Mantenimiento ETSEIB)

Se puede observar lo comentado anteriormente, se han modificado las potencias de P1 a P5 y mantenido la potencia en P6, de manera que esta variación sólo conlleve un cambio administrativo. Al ser una reducción, no se ha de tener en cuenta la potencia máxima de la instalación (Pot. Máxima BIE)

Siguiendo directrices de la ISO 50001, sería interesante observar si para este 2017 este cambio de las potencias contratadas fue el adecuado y si se pudo cumplir el pronóstico de ahorro vaticinado.

Caso práctico

Para el caso de estudio, no ha sido posible obtener la curva cuarto horaria de distribuidora, por lo que se ha aprovechado de nuevo el software SIRENA. El aplicativo permite obtener la lectura de máxímetros de un año y exportarla a .xls. Serán necesarios 24 (horas) · 4 (cuartos de hora) · 365 (días) = 35.040 registros.

Por otro lado se han descargado los períodos tarifarios correspondientes al año 2016 de la liquidación anual de REE. Se ha de tener en cuenta que en alta tensión varían de un año para otro, por lo que si se quiere estudiar otro año, se han cambiar los valores.

Sabiendo que la tarifa contratada para la escuela es a modalidad indexada, el término de potencia corresponde al valor BOE:

Tarifa	P1 [€/kw/año]	P2 [€/kw/año]	P3 [€/kw/año]	P4 [€/kw/año]	P5 [€/kw/año]	P6 [€/kw/año]
6.X BOE	39,139427	19,586654	14,334178	14,334178	14,334178	6,540177

Tabla 5.6 Término de potencia para tarifas indexadas 6.X (Fuente: Orden ITC 688/2011)

a) Situación actual

Se introducen los períodos tarifarios (P1 a P6) de 2017 en una hoja de cálculo.

Figura 5.19 Períodos tarifarios para tarifas 6.X para el año 2017 (Fuente: <https://www.esios.ree.es/es>)

Se introduce la fecha, la hora, los valores de los máxímetros, las potencias actuales y el término de potencia contratado.

Figura 5.20 Determinación de potencias óptimas para tarifas 6.X

El algoritmo consiste en calcular el exceso de potencia, si lo hay, para cada cuarto de hora. Esto se realiza en la columna H de la hoja de cálculo según la fórmula:

$$\text{Exceso} = (P_{dj} - P_{ci})^2 \quad \text{Ec. (5.5)}$$

El siguiente paso consiste es agrupar excesos según período y realizar el resto de la ecuación 6.3:

$$FP_{(ep)} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot 1.4064 \cdot Ae_i \quad \text{Ec. (5.6)}$$

Donde Ae_i corresponde a la raíz de los excesos para cada período i .

SUMA EXCESOS		PERIODOS					
MESES		1	2	3	4	5	6
	1	3654047	2319885	0	0	0	0
	2	256368,1	133140	0	0	0	0
	3	0	0	0	27109,95	0	0
	4	0	0	0	0	2437,947	0
	5	0	0	0	0	2078,392	0
	6	561811	114147,7	110594,6	1235,507	0	0
	7	277776,3	59921,92	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	778,4923	386266,1	0	0
	12	3585468	2606898	0	0	0	0

Ae_i		PERIODOS					
MESES		1	2	3	4	5	6
	1	1911,556	1523,117	0	0	0	0
	2	506,3261	364,6836	0	0	0	0
	3	0	0	0	164,651	0	0
	4	0	0	0	0	49,37557	0
	5	0	0	0	0	45,58939	0
	6	749,5405	337,8576	332,5576	35,14978	0	0
	7	527,0449	244,7895	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	27,90148	621,5031	0	0
	12	1893,533	1614,589	0	0	0	0

F_{pi}		PERIODOS					
MESES		1	2	3	4	5	6
	1	2687,801	1070,812	0	0	0	0
	2	711,9378	256,5278	0	0	0	0
	3	0	0	0	85,65361	0	0
	4	0	0	0	0	25,68762	0
	5	0	0	0	0	23,71786	0
	6	1053,914	237,5274	173,013	18,28666	0	0
	7	741,0673	172,0968	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	14,51573	323,3368	0	0
	12	2662,459	1135,121	0	0	0	0
							11393,5

Figura 5.21 Cálculo de los excesos de potencia

Así, para la situación actual los costes del término de potencia sin contar IVA ni IEE se dividen en:

Actual	
$Fp(c)$	$Fp(ep)$
101.235,2 €	611,37 €
101.846,59 €	

La valoración inicial de la situación actual es que las potencias contratadas son de valores suficientemente alto para hacer frente a la demanda, pues los excesos de potencia tienen

muy poco impacto en la facturación. Dado que los valores de los máxímetros están por debajo de la potencia contratada en la mayoría de los casos, parece probable que una reducción es posible.

Para observar la evolución después de la optimización de 2016 y corroborar el ahorro estimado en la tabla 6.4, basta con cambiar los períodos tarifarios al año 2016 y obtener los valores de máxímetro del mismo año. Se utiliza la misma hoja de cálculo y se calculan los costes con las potencias iniciales y con las optimizadas. Los resultados se muestran a continuación:

	P1...P5 [kW]	P6 [kW]	Fp(c)	Fp(ep)	Total
2016	1480	1480	160.237,81 €	0,00 €	160.237,81 €
	900	1480	101.235,22 €	3.078,49 €	104.313,71 €

Ahorro (IVA y IEE incluidos)	
34,90%	71.126,01 €

Tabla 5.7 Ahorro obtenido en la optimización

El ahorro obtenido con la optimización durante el año 2016 fue de 71.126,01 €, un poco por debajo por los 88.503,84 € estimados. El motivo más probable de esta diferencia es que el estudio de optimización se realizase con la curva cuarto horaria de 2015, la disponible en aquel momento, y que en el año 2016 la curva hay sido un tanto diferente.

b) Nueva optimización

Para llevar a cabo la optimización se utiliza el solver de Excel 2016. La celda objetivo a minimizar en este caso corresponde al término total de facturación de la potencia $Fp(c)$, y no el ahorro como sucedía en la optimización de tres períodos. Las restricciones a imponer corresponden a la ecuación 5.4.

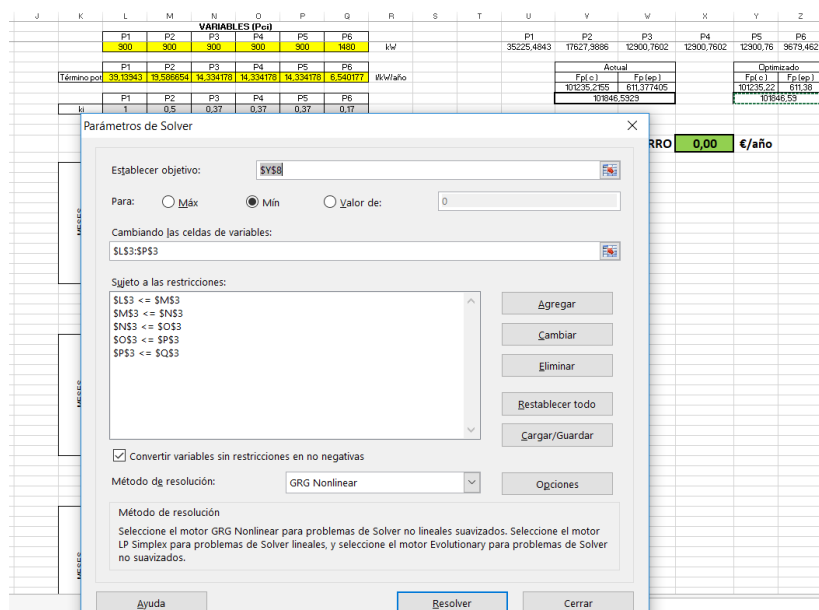


Figura 5.22 Configuración del solver

Una vez convergida, la solución arroja los siguientes resultados:

P1 [kW]	P2 [kW]	P3 [kW]	P4 [kW]	P5 [kW]	P6 [kW]
673,79	673,79	673,79	673,79	673,79	1480

Como se observa, la optimización se ha llevado a cabo siguiendo las directrices de la primera optimización: mantener constante P6.

El coste asociado al término de potencia para esta optimización es el siguiente:

Optimizado	
Fp(c)	Fp(ep)
78.223,46	11.393,48
89.616,94 €	

El ahorro que se podría lograr para esta instalación con respecto a la situación actual, y siempre y cuando se respeten las consideraciones vistas en la introducción del apartado 5.3, podría llegar a ser de:

$$\text{Ahorro} = (101.846,59 - 89.616,94) \cdot \text{IVA} \cdot \text{IEE} = 15.554,05 \text{ €/año}$$

5.4. Análisis de red

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.1, los costes asociados a la calidad de red (costes técnicos) pueden tener un gran impacto en la factura eléctrica. En este apartado se aprovecha la herramienta de Circutor para hacer un análisis de la calidad de red en los tres transformadores que tiene el edificio. Aprovechando de nuevo el SGE instalado en la escuela, se visualizan las gráficas para la salida de los 3 transformadores en un día laborable: el pasado 13 de diciembre de 2017, en un espacio de tiempo comprendido entre las 00 horas y las 23:59 horas.

5.4.1. Compensación de líneas

El primer aspecto a considerar en una instalación trifásica es que las fases eléctricas estén compensadas. Una descompensación de las líneas puede provocar una sobrecarga de los conductores de fase y de neutro, valores más altos de pérdidas por efecto Joule, mayores caídas de tensión o también puede producir disparos de las protecciones del transformador por sobrecarga de la fase más utilizada. La descompensación de las líneas trifásicas suele ser debido a la conexión de cargas monofásicas en las mismas líneas o también, por una incorrecta conexión de los diferentes aparatos, lo que comporta que la corriente que circula por estas líneas sea mayor que por la tercera.

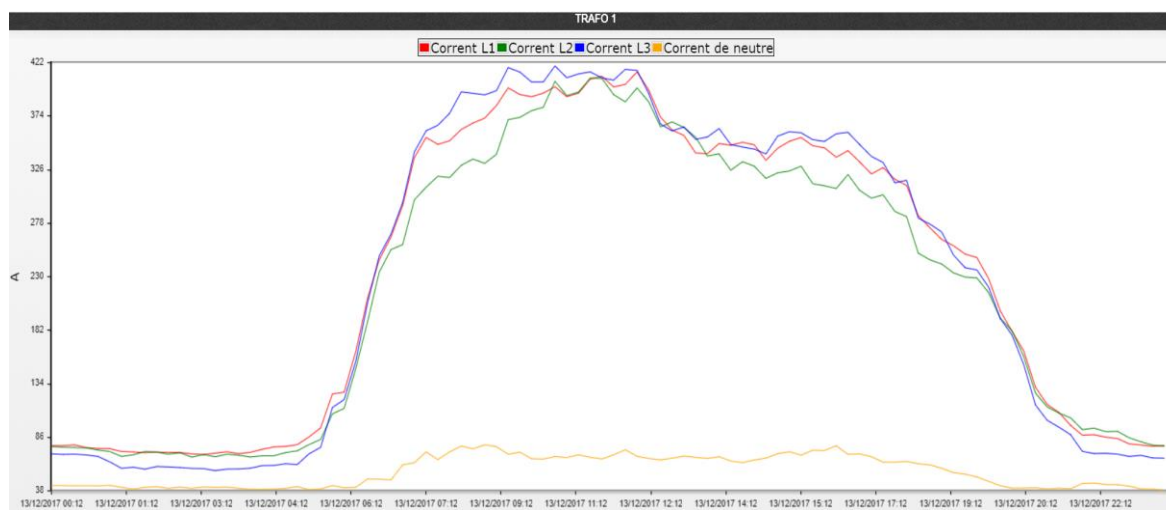


Figura 5.23 Compensado de líneas en transformador 1

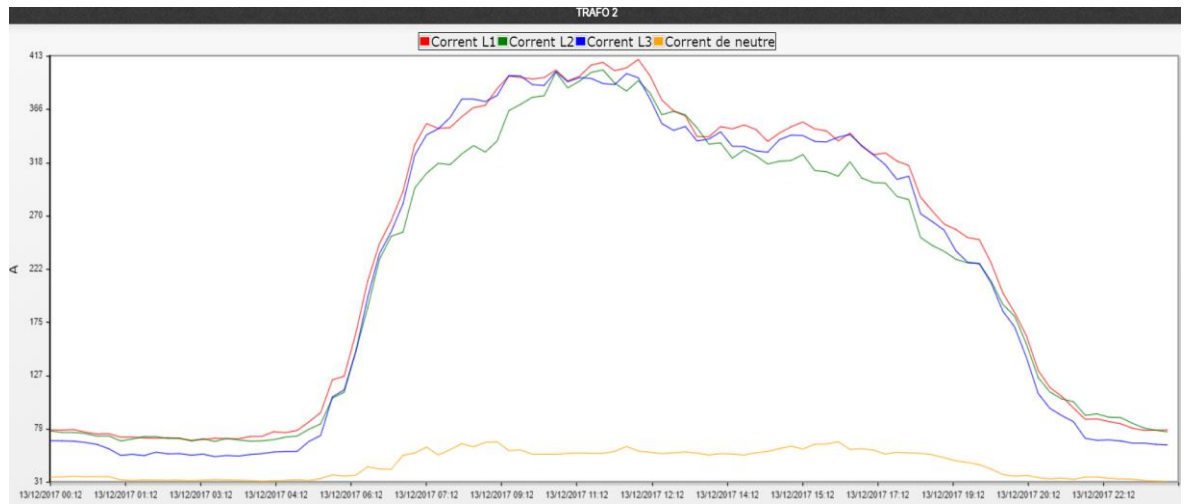


Figura 5.24 Compensado de líneas en transformador 2

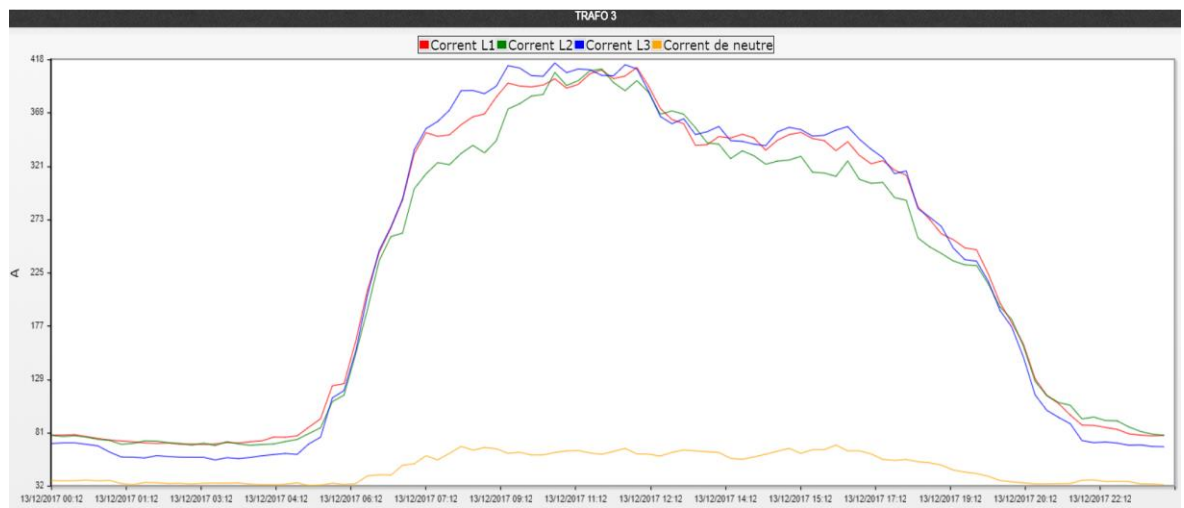


Figura 5.25 Compensado de líneas en transformador 3

En términos porcentuales, en las figuras 5.23, 5.24 y 5.25, no se observa que ninguna línea de los 3 transformadores esté más sobrecargada que el resto. Por el contrario, se puede apreciar que el neutro presenta carga. Con el circuito en reposo, esta carga residual es de aproximadamente 30 A, mientras que para una situación de carga, el corriente en neutro es de unos 60-70 A para los tres transformadores. Pese a que la situación ideal es un corriente de neutro igual a 0 A, la realidad es que en pocas instalaciones se consiguen estos resultados. En este caso, la sección del conductor neutro es de la mitad de fase, pero no existe riesgo de funcionamiento ya que los valores de corriente son inferiores al 15% de fase en situación de carga.

5.4.2. Nivel de armónicos

Siguiendo con el análisis de la red, conviene determinar la presencia o no de armónicos en la red.

Para observar este fenómeno se recurre al indicador THD (Tasa de Distorsión Armónica), que muestra la relación entre el valor eficaz del residuo armónico de la tensión y/o corriente y el valor de la componente fundamental:

$$\text{THD}(U)\% = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots}}{U_1} \quad \text{Ec. (5.7)}$$

$$\text{THD}(I)\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \quad \text{Ec. (5.8)}$$

Siendo:

- U_1 o I_1 : Componente sinusoidal de orden 1 del desarrollo en serie de Fourier de frecuencia igual a la onda periódica original.
- U_n o I_n : Componente sinusoidal de orden superior a 1 del desarrollo en serie de Fourier de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia origen.

Se recogen datos mediante el SGE en los tres transformadores para analizar este fenómeno.

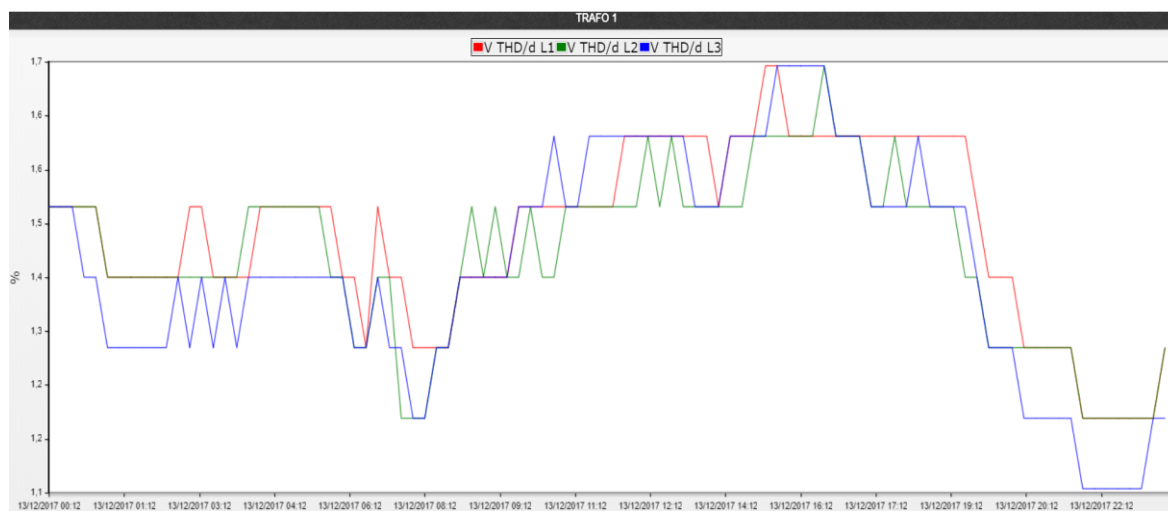


Figura 5.26 THD (U) para cada una de las líneas del transformador 1

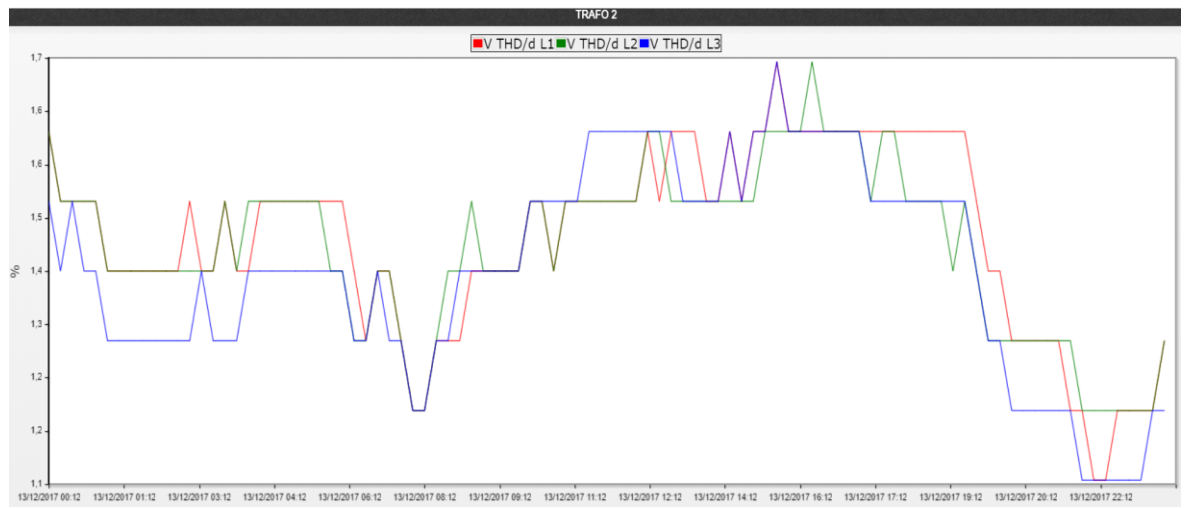


Figura 5.27 THD (U) para cada una de las líneas del transformador 2

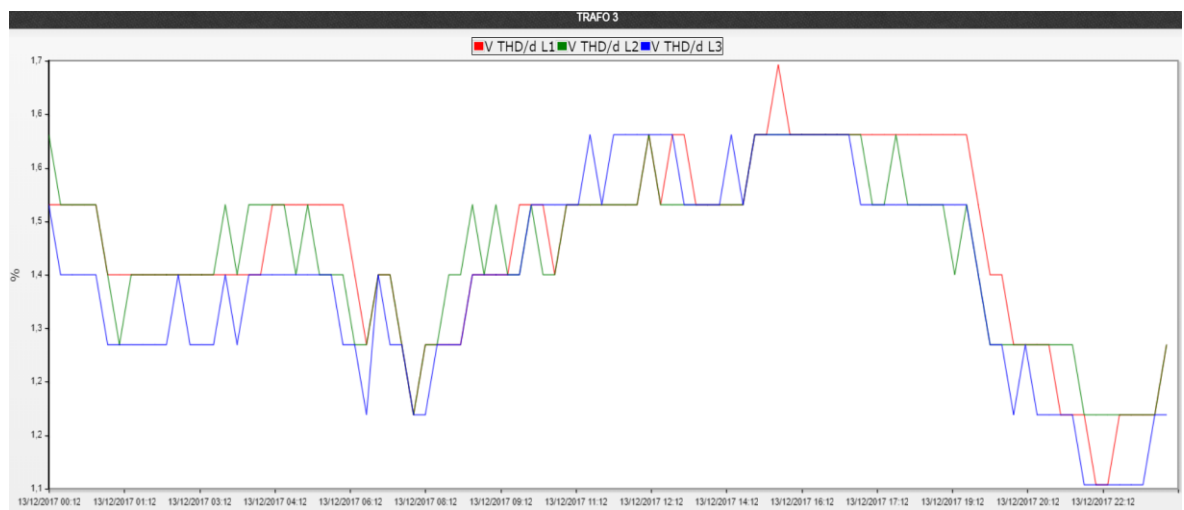


Figura 5.28 THD (U) para cada una de las líneas del transformador 3

Se puede observar que en las gráficas 5.26, 5.27, 5.28 las variaciones de distorsión armónica de tensión para cada línea están por debajo del valor límite recomendable de 5% [12] por lo que no hay riesgo de funcionamiento incorrecto debido a armónicos de tensión.

Sin embargo, el software no permite realizar el mismo análisis para el conductor neutro, por lo que es posible que se esté perdiendo cierta información que puede aportar valor añadido a la gestión.

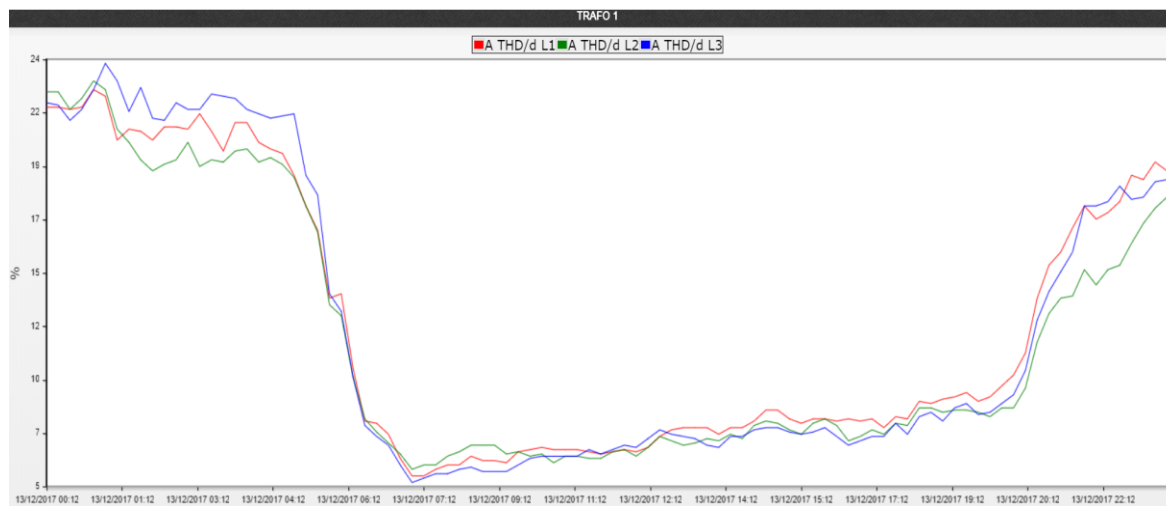


Figura 5.29 THD (I) para cada una de las líneas del transformador 1

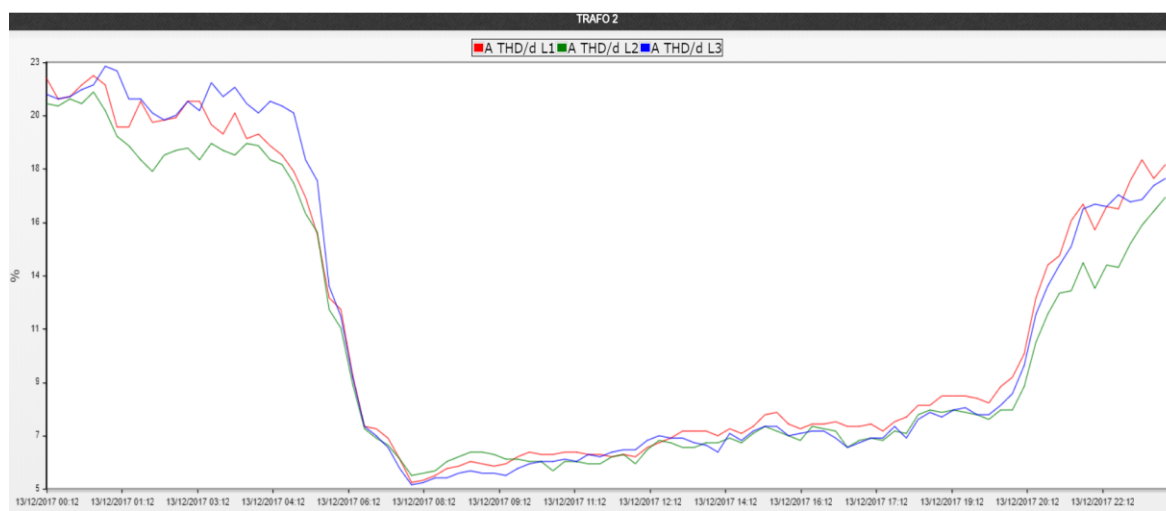


Figura 5.30 THD (I) para cada una de las líneas del transformador 2

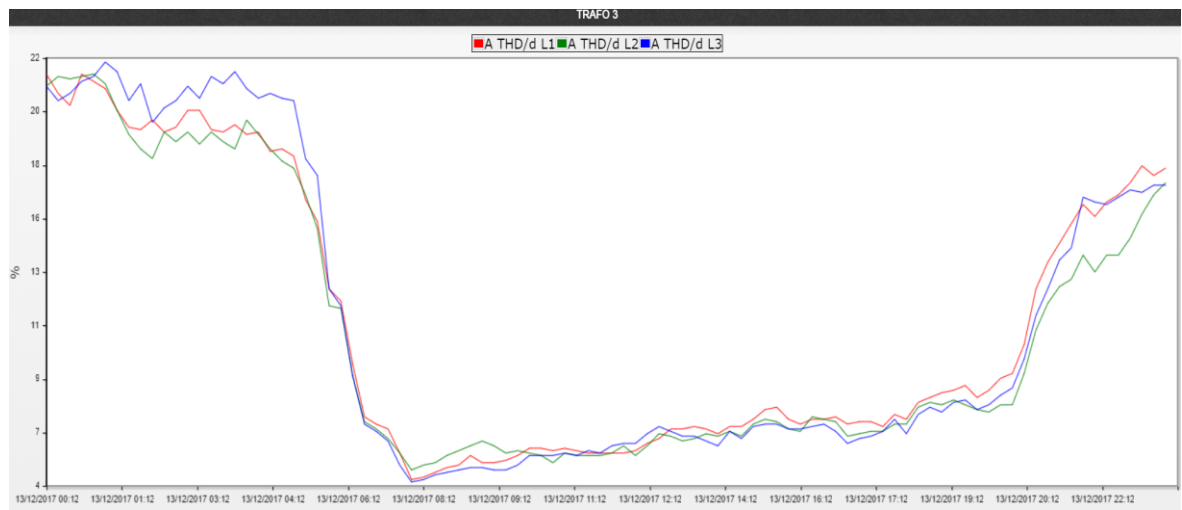


Figura 5.31 THD (I) para cada una de las líneas del transformador 3

En cuanto al nivel de armónicos de corriente, se observa una diferencia de comportamiento. Cuando el edificio no está en horario de servicio (de las 21 h a las 6 h aproximadamente) el THD (I) aumenta hasta valores del 20% valor que se considera límite [12] para un buen funcionamiento de los equipos. En cambio, en horario de actividad, los valores descienden a niveles por debajo del 10%,

Nuevamente, hacer mención de la falta de información correspondiente al THD de corriente del conductor neutro.

5.4.3. Factor de potencia

Una manera análoga de comprobar que realmente en la actualidad pueda existir un problema con la compensación de la energía reactiva es observando la evolución del factor de potencia FP, que no es más que la relación entre la potencia activa y la aparente. Un FP igual a 1 querría decir que no existe reactiva en la red.

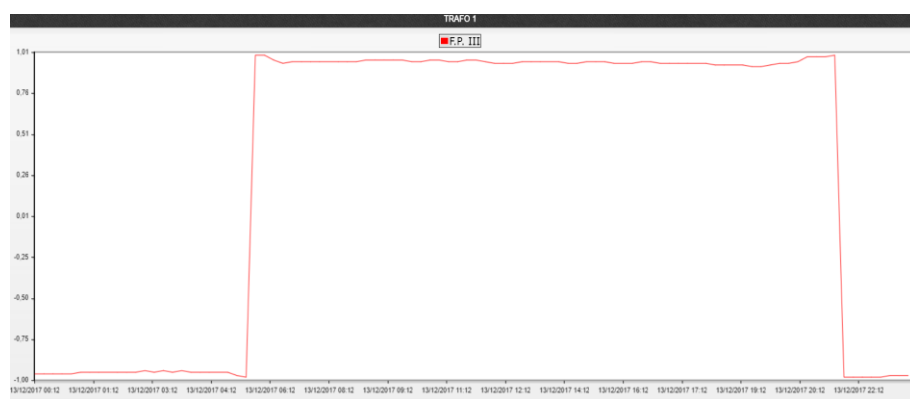


Figura 5.32 Evolución del factor de potencia transformador 1

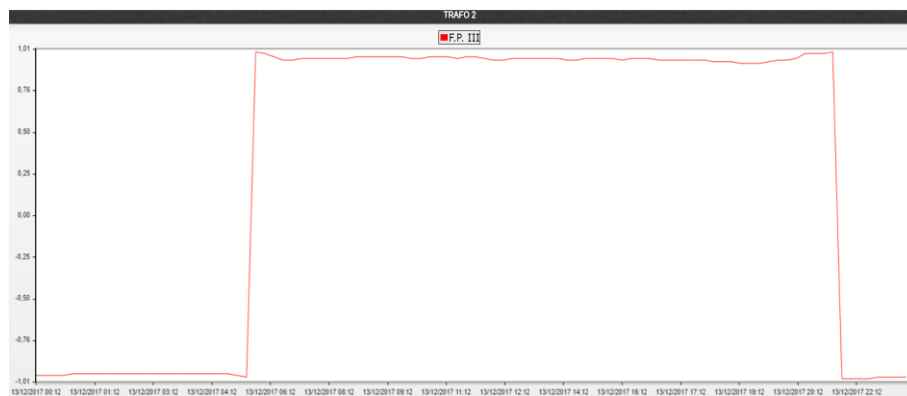


Figura 5.33 Evolución del factor de potencia transformador 2

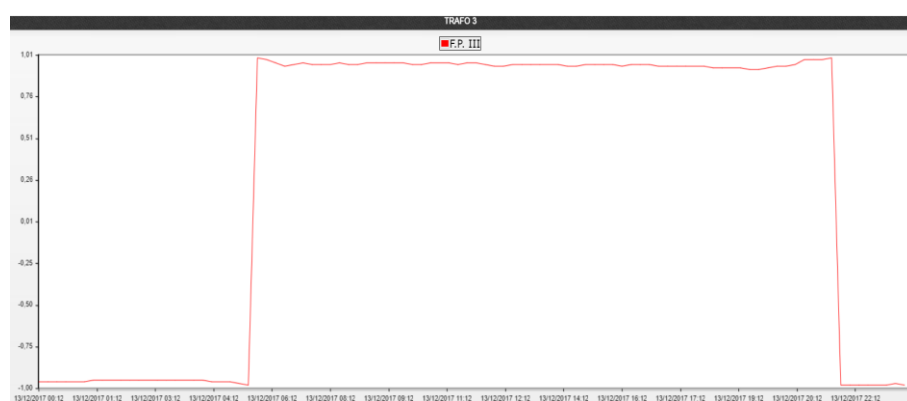


Figura 5.34 Evolución del factor de potencia transformador 3

Tal y como se observa en las figuras 5.32, 5.33 y 5.34, el FP para los tres transformadores sigue la misma tendencia. En horas de poca carga, el FP cae hasta valores negativos (entre -0,95 y -0,98), mientras que en las horas de actividad en la escuela los valores se mantienen entre 0,95 y 0,98.

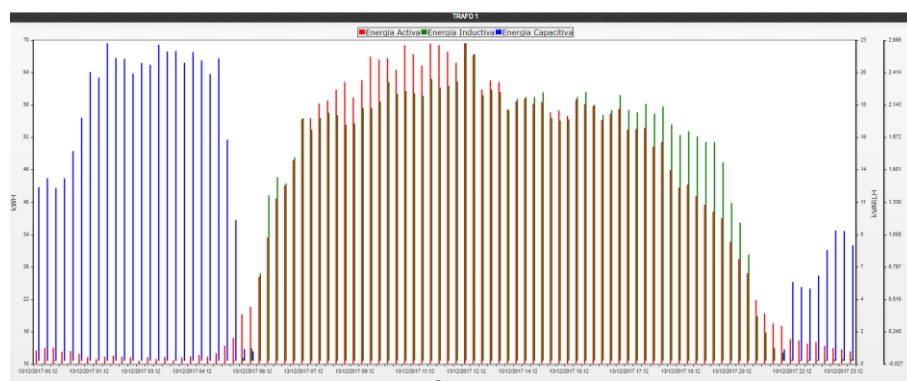


Figura 5.35 Consumo de energía capacitiva en día lectivo

El motivo por el que el FP presenta valores negativos es debido a la aparición de energía capacitiva, consecuencia de los equipos digitales, como pueden ser ordenadores o pantallas, que se dejan en *stand by* durante la noche consumiendo potencia capacitiva. Estos valores de energía capacitiva no son relevantes y no suponen ningún riesgo para la instalación tal y como se puede ver en la figura 5.35.

Por tanto, se puede concluir que la situación de funcionamiento es correcta y no existen riesgos de mal funcionamiento por un FP bajo, ya que en horas de actividad el valor es muy próximo a la unidad.

6. Medidas de ahorro y análisis económico

En este apartado se proponen algunas medidas de eficiencia energética tras los resultados obtenidos, así como su análisis económico y viabilidad para posible implantación.

6.1. Propuesta 1: Nueva optimización de potencia

Los resultados arrojados en el análisis realizado en el apartado 5.3.2 muestran que una nueva optimización es posible siempre y cuando se respeten las premisas ya vistas para llevar a cabo un cambio en las potencias contratadas.

Variar la potencia contratada a través de la comercializadora eléctrica se denomina derecho de enganche, y según la Orden ITC/3519/2009 para alta tensión ($V < 36\text{kV}$) el coste asociado es de 79,49197 €/actuación.

	P1...P5	P6	Fp(c)	Fp (ep)
Situación Actual	900 kW	1480 kW	101.235,22 €	3.078,49 €
Situación Optimizada	674 kW	1480 kW	78.223,46 €	11.393,48 €

Tabla 6.1 Comparación de potencias y coste tras optimizar

Como se ha visto anteriormente se traduce en un ahorro de:

$$\text{Ahorro} = (101.846,59 - 89.616,94) \cdot \text{IVA} \cdot \text{IEE} = 15.554,05 \text{ €}$$

Y teniendo en cuenta los costes de enganche puede suponer un ahorro para el año de implantación de:

$$15.554,05 \text{ €} - 79,49197 \text{ €} = 15.474,558 \text{ €}$$

6.2. Propuesta 2: Implantación ISO 50001

Durante la realización de este trabajo se ha ido haciendo uso del software SIRENA y PowerStudio para analizar el comportamiento del edificio. Sin embargo, según lo comentado con el responsable del departamento de mantenimiento, el personal no obtiene todo el rendimiento a esta herramienta de monitorización. Los motivos de esta situación son los siguientes:

- Falta de material informático que permita acceder a la plataforma sin necesidad de permanecer en oficina. Dado que la mayor parte del tiempo, el personal se encuentra fuera de la oficina realizando las tareas de mantenimiento, el uso de la plataforma queda reducido a archivar los datos de consumo.
- Avisos vía telefónica. Se trata de un hecho derivado del anterior, las alarmas programadas no son recibidas y resulta más fácil acudir al punto del problema tras un aviso por llamada telefónica después de producirse la avería.

Según lo visto en el apartado 2.3, el hecho de que la escuela disponga de analizadores de red que permiten medir, almacenar y analizar los consumos eléctricos de forma individualizada (plantas o pabellones) y en el tiempo (mensual, horario, diario, ...) hace que esta organización sea un espacio ideal para la implantación de la ISO 50001. A través de esta normativa, se consigue estandarizar los procedimientos y con una formación eficiente e involucración del personal se pueden llegar a conseguir objetivos de ahorro interesantes.

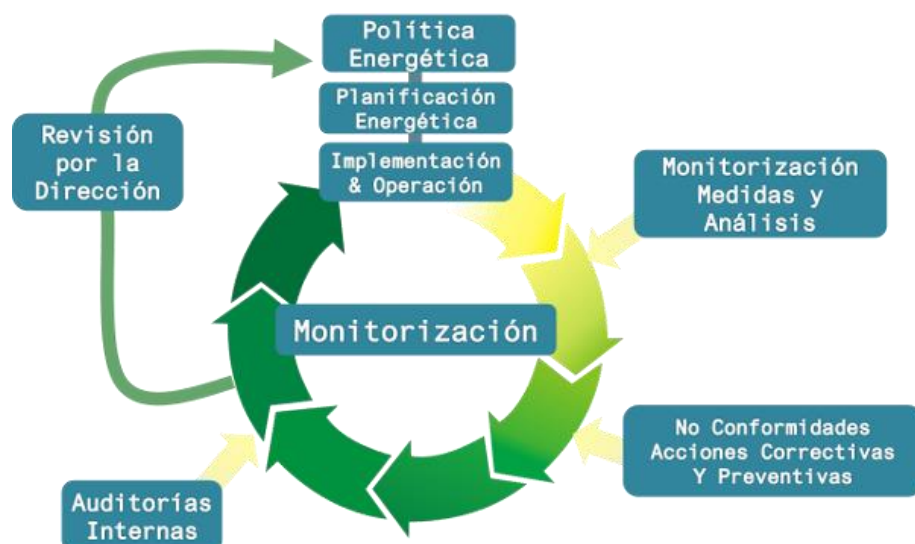


Figura 6.1 Modelo de sistema de gestión energética de la ISO 50001 (Fuente: <http://iso50001.nom.es/el-metodo/>)

En la figura 6.1 se muestran las etapas a seguir para un correcto funcionamiento de la ISO, desde una primera etapa en la que se establecen objetivos en base a la política energética de la entidad, pasando por el uso del software como herramienta básica de control y finalizando con la revisión de la dirección. Este círculo pone de manifiesto la implicación a todos los niveles de la organización para un perfecto desarrollo de la misma.

La normativa ISO 50001 conllevaría unas pautas de actuación más precisas y exprimir el uso del software de monitorización, que permitirían:

- A partir de conocer el número de alumnos matriculados por asignatura y el lugar de impartición de las clases se pueden extraer indicadores de consumo por estudiante o espacio (kWh/alumno, kWh/m²,...) y realizar seguimiento, así como comparar con otros edificios similares.
- Establecer clasificaciones de consumo por planta/pabellón, imputar estos consumos a investigación o docencia según su procedencia y hacer seguimiento.
- Detectar qué departamentos consumen más durante el horario de inactividad para actuar sobre ellos.

Dado que no es cuantificable ahora mismo cuáles podrían ser los objetivos a conseguir, no se ha calculado el coste de implantación de esta normativa.

7. Presupuesto

En este apartado se establece el presupuesto necesario para llevar un trabajo como el que se ha ido comentando a lo largo de esta memoria. Se divide en dos componentes: el coste referente al material y el coste referente a personal.

Coste recursos materiales							
Descripción	Precio unitario		Amortización	Am. anual	Unidades		
Hardware							
Ordenador portátil	€	750,00	5 años	€ 150,00	0,5 años	€	75,00
Material de oficina						€	20,00
Software							
Licencia Office 360	€	100,00	5 años	€ 20,00	0,5 años	€	10,00
TOTAL						€	105,00

Coste recursos humanos				
Descripción	Precio unitario		Unidades	
Documentación	€	25,00	50 horas	€ 1.250,00
Estudio y análisis	€	25,00	130 horas	€ 3.250,00
Redacción de memoria	€	25,00	70 horas	€ 1.750,00
TOTAL				€ 6.250,00

Presupuesto total del proyecto	
Descripción	€ 105,00
Coste recursos materiales	€ 6.250,00
Coste recursos humanos	€ 6.355,00
Subtotal	€ 635,50
Costes operativos (10%)	€ 6.990,50
Presupuesto de ejecución sin IVA	€ 1.468,01
IVA (21%)	
TOTAL	€ 8.458,51

Tabla 7.1 Presupuesto del proyecto

8. Impacto ambiental

A diferencia de otros proyectos, el impacto ambiental del trabajo no tiene gran relevancia ya que se trata de un estudio de consultoría sin aplicaciones prácticas. Durante el trabajo se ha hecho uso de un portátil, una licencia de Office 365 y consumo de red eléctrica. Por lo tanto, el único impacto ambiental computable sería lo correspondiente al uso de energía eléctrica y los desplazamientos en transporte público para las reuniones con el tutor.

Por ello, siguiendo con la temática del proyecto, se ha optado en este apartado por realizar un análisis comparativo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para los años 2016 y 2017 del edificio estudiado.

Las emisiones de GEI asociadas a la actividad de una organización se pueden clasificar según sean emisiones directas o emisiones indirectas [13].

- Las emisiones directas son las emisiones de fuentes que poseen o controla el sujeto que genera la actividad.
- Las emisiones indirectas son las emisiones que son consecuencia de las actividades que el sujeto realiza, pero que tiene lugar en fuentes que posee o controla otro sujeto.

En concreto se pueden definir tres alcances según las emisiones a las que referirse:

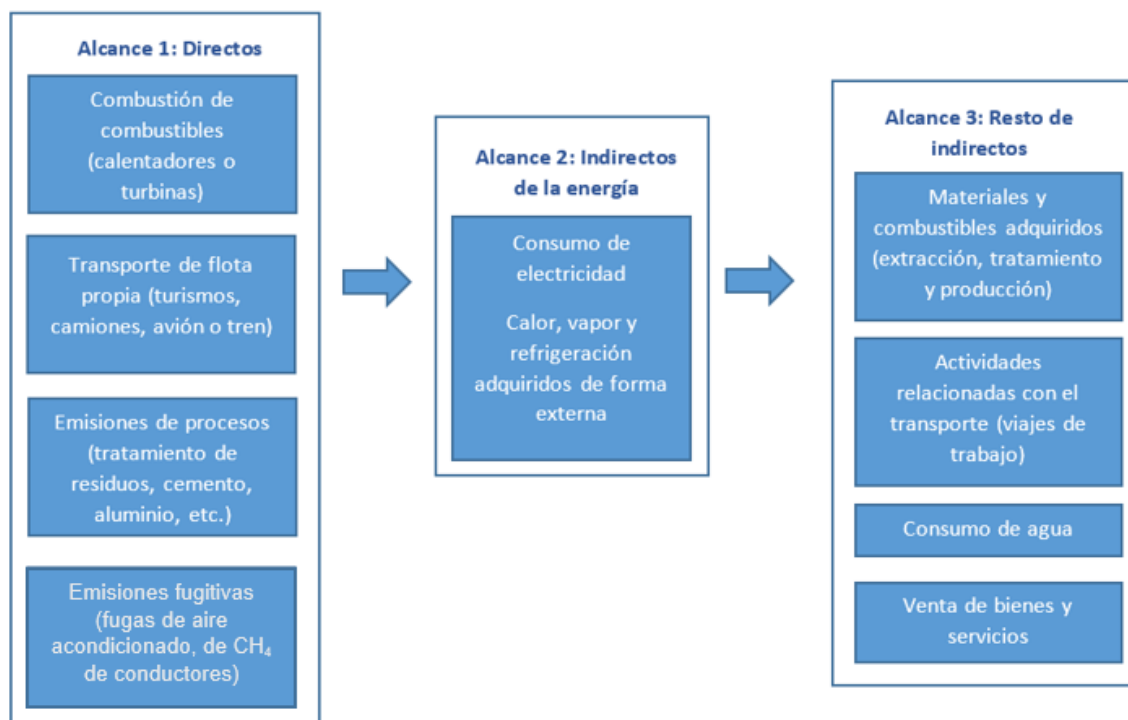


Figura 8.1: Clasificación de las emisiones GEI (Fuente: *Oficina Catalana del Canvi Climàtic*)

Tal y como se muestra en la figura 8.1, el impacto ambiental asociado al consumo de energía eléctrica estaría dentro del alcance 2. Para calcular los factores de emisión asociados, se ha de aplicar un factor de emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico – también conocido mix eléctrico (g de CO₂/kWh) – que representa las emisiones asociadas a la generación eléctrica.

En Cataluña, la electricidad consumida y que no ha sido autogenerada, proviene de la red eléctrica peninsular, sin poder distinguir exactamente en qué planta de generación se ha producido. Por lo tanto, los datos que se utilizan para el cálculo del mix eléctrico son los correspondientes a la red eléctrica peninsular. Así, para la electricidad consumida de la red existen dos variantes:

- Electricidad consumida que disponen de certificado de garantía de origen renovable (GdO). En este caso se aplica un factor de emisión de 0 g CO₂/kWh.
- Electricidad consumida que no dispone de GdO. En este segundo caso existen dos opciones, o bien aplicar el mix que proporciona la compañía comercializadora o bien aplicar el mix general de la red.

Para el caso de estudio, no se ha podido disponer de información sobre el tanto por ciento de energía renovable certificada para los años 2016 y 2017. Sin embargo, se sabe que para el año 2017, una de las premisas era que al menos el 50% de la energía eléctrica consumida proviniera de origen renovable con GdO [1], por lo que se establece un 50% del consumo eléctrico como energía con factor de emisión 0 g CO₂/kWh para el cálculo de emisiones.

Así, para ver el impacto ambiental a nivel de GEI se ha utilizado el mix general de la red para los años 2016 y 2017. Los resultados se muestran a continuación:

	2016	2017
Consumo sin GdO (kWh)	2.674.600	1.089.770
Mix eléctrico (g CO₂/ kWh)	308	392
Emisiones (t CO₂)	823,776	427,189

Tabla 8.1 Emisiones de GEI en la ETSEIB (datos de mix eléctrico extraído del OCCC)

La reducción en las emisiones en 2017 es considerable, de un 48,14% respecto a 2016. Además de la reducción de consumos de un 18,5% de un año a otro, el impacto de tal

reducción es debido a la contratación del 50% de la energía de origen renovable, que hace obtener esa reducción pese al incremento del mix eléctrico español de 2017.

Para la licitación energética del año 2018 se ha establecido como requisito para la empresa adjudicataria que el 100% de la energía consumida ha de tener GdO [4].

Conclusiones

El objetivo de este proyecto era el de proyectar las virtudes de la implantación de un sistema de monitorización energética. Gracias al uso de este software se ha visto que es posible detectar información valiosa para la organización y que puede suponer una ventaja competitiva. Esta información relevante puede ser:

- Tener bajo control las variables que son objeto de facturación como la energía activa, la potencia y la energía reactiva. De este modo es posible saber cuánto se va a pagar de factura eléctrica antes de recibir la misma por parte de la comercializadora y poder validarla.
- Detectar eventos según la curva de consumo y conocer consumos residuales para poder actuar sobre ellos.
- Detectas posibles ahorros en factura como pueden ser optimizaciones en la potencia contratada o desplazar los picos de demanda a horas de menor consumo.
- Control sobre parámetros más específicos como el factor de potencia, existencia de armónicos, potencia reactiva o desequilibrio entre fases, para disminuir los costes técnicos de la instalación.

En la parte referente al estudio sobre la escuela, las conclusiones que se han extraído gracias a la monitorización son las siguientes:

- Se ha conseguido una reducción en el consumo eléctrico del edificio ETSEIB de casi 500.000 kWh (18,5%) de 2016 a 2017.
- El edificio tiene un consumo residual de entre 100 y 200 kWh en las horas de inactividad. Este consumo es mayor en época de verano, seguramente condicionado por el uso de equipos de climatización durante la noche.
- Actualmente, pese a no contar con las baterías de condensadores, no existe penalización por energía reactiva.
- La optimización de potencia de 2016 supuso un ahorro de 71.126 € (34,9% respecto al anterior en el término de potencia). Pese a ello, se ha observado que una nueva optimización es posible, pudiendo disminuir el término fijo de

la factura todavía más.

En las mediciones efectuadas en los analizadores de red de los transformadores, se ha observado:

- No existe riesgo de desperfectos en la instalación debidos a descompensación de fases. Pese a que la corriente en neutro no es cero en ningún transformador, las fases se encuentran equilibradas a nivel porcentual.
- La presencia de armónicos de tensión o corriente no suponen un riesgo importante para la instalación, ya que se encuentran por debajo de los límites admisibles.
- El factor de potencia para el período estudiado se encuentra cercano a 1, por lo que el funcionamiento de la instalación en ese aspecto es correcto.

Por último, hacer mención a algunas funcionalidades que el sistema de monitorización ahora mismo no permite y que pueden ser objeto de mejora en el futuro:

- Incorporar analizadores en la instalación para monitorizar consumos de gas o de agua en tiempo real y poder realizar análisis semejantes a los que se han llevado a cabo con la electricidad.
- Hacer más accesible la descarga de información desde el aplicativo de PowerStudio y que pueda ser manipulable fuera de esta interfaz.
- Posibilidad de comparar más de un analizador en el aplicativo.
- Incorporar discriminación horaria de 6 períodos para visualizar la información referente al consumo de manera más rápida.

Agradecimientos

Agradecer al director del proyecto Roberto Villafáfila tanto su predisposición para las reuniones mantenidas como la ayuda y documentación facilitada.

Agradecer a mi familia, en especial mi madre, mi padre y hermano por el apoyo que me han dedicado durante esta última etapa.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA-GESTIÓ SOSTENIBLE. *Informe SIRENA 2016: Avaluació del consum d'energia i aigua de la UPC* [En línea] Disponible en: <<https://www.upc.edu/energia2020/ca/noticies/informe-sirena-2016-avaluacio-del-consum-d2019energia-i-aigua-de-la-upc>> [última consulta: 9 de diciembre de 2017]
- [2] DEXMA. *SIRENA 3.6.43: Dashboard Universitat Politècnica de Catalunya*. Disponible en: <<https://sirenaupc.dexcell.com/dashboard/widgets.htm>> [última consulta: 28 de marzo de 2018]
- [3] CIRCUTOR. PowerStudio ETSEIB. Disponible en: <<http://circuitormante.upc.edu/html5/index.html>> [última consulta: 11 de abril de 2018]
- [4] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA-GESTIÓ SOSTENIBLE. *Informe SIRENA 2017: Avaluació del consum d'energia i aigua de la UPC* [En línea] Disponible en: <<https://www.upc.edu/energia2020/ca/noticies/informe-sirena-2017-avaluacio-del-consum-d2019energia-i-aigua-de-la-upc>> [última consulta: 15 de enero de 2018]
- [5] SCHNEIDER ELECTRIC. *Blog de Schneider Electric: Normativa energética*. [En línea] Disponible en: <<https://blogespanol.schneider-electric.com/normativa-energetica/2018/03/12/iso-leed-breeamcomo-contribuye-ecostruxure-la-certificacion-sostenible-edificios/>> [última consulta: 2 de marzo de 2018]
- [6] ESPAÑA. *Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre de 2001, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica*. [En línea]. Boletín Oficial del Estado, núm. 268, Artículo 9. Disponible en: <<https://www.boe.es/boe/dias/2001/11/08/pdfs/A40618-40629.pdf>> [última consulta: 16 de enero 2018]
- [7] ESPAÑA. *Orden ITC/688/2011, de 30 de marzo, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de abril de 2011 y determinadas tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial*. [En línea] Boletín Oficial del Estado, núm. 77. Disponible en: <<http://www.boe.es/boe/dias/2011/03/31/pdfs/BOE-A-2011-5757.pdf>> [última consulta: 19 de enero 2018]
- [8] EUROPEAN COMMISSION. *The EU Emissions Erading System (EU ETS)* [En línea]

Disponible en: <https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf> [última consulta: 19 febrero de 2018]

- [9] CIRCUTOR. *Ficha técnica EDS (Eficiency Data Server)*. [En línea] Disponible en: <http://circutor.es/docs/FT_EDS_SP.pdf> [última consulta: 17 de enero de 2018]
- [10] CIRCUTOR. *Ficha técnica Serie CVM*. [En línea] Disponible en: <<http://circutor.es/es/productos/medida-y-control/analizadores-de-redes-fijos/analizadores-de-redes>> [última consulta: 3 de febrero de 2018]
- [11] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA. *Liquidación C5 períodos tarifarios 2017* [En línea] Disponible en: <<https://www.esios.ree.es/es>> [última consulta: 15 de febrero de 2018]
- [12] SCHNEIDER ELECTRIC. *Guía de diseño de instalaciones eléctricas. Capítulo M: Detección y filtrado de armónicos*. [En línea] Disponible en: <https://www.schneiderelectric.es/documents/local/productos-servicios/distribucion_electrica/guia_instalaciones_electricas/capitulo-m-deteccion-filtrado-armonicos.pdf> [última consulta: 11 de febrero de 2018]
- [13] OFICINA CATALANA DEL CANVI CLIMÀTIC. *Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) versió de 1 març de 2018*. [En línea] Disponible en: <http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduceix_emissions/Com_calcular_emissions_GEH/guia_de_calcul_demissions_de_co2/18_Guia-practica-calcul-emissions_sense-canvis_CA.pdf> [última consulta: 27 de marzo de 2018]

Bibliografía complementaria

CIRCUTOR. *Guía técnica de eficiencia energética eléctrica*. [En línea] Disponible en: <http://circuitor.com/docs/GUIA_EEE_SP-LR.pdf> [última consulta: enero 2018]

TÜV SÜD. *Management System Certification*. [En línea] Disponible en: <<https://www.tuv-sud.com/activity/auditing-system-certification/iso-50001>> [última consulta: enero 2018]

ECAMEC TECNOLOGIA. *Corriente de Neutro en Sistemas No Lineales* [En línea] Disponible en: <<http://copigmza.org.ar/wp-content/uploads/2016/12/Corriente-en-el-neutro.pdf>> [última consulta: febrero 2018]

MERLÍN GERIN. *Función y protección del neutro en una instalación BT*. [En línea] Disponible en: <<http://www.apilet.es/utilidades/descargar.php?a=115&b=4&c=3a20eacfaf735d4c9b35b55bac4adaa8>> [última consulta: febrero 2018]

ZERO CONSULTING. *Comparativa LEED vs BREEAM*. [En línea] Disponible en: <<http://www.zeroconsulting.com/es/post/leed-vs-breeam-1>> [última consulta: marzo 2018]